

ESTUDIO DE DISEMINACIONES DE ORO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA EN EXPLORACIÓN MINERA

José Fernandes de Oliveira Ugarte

Diego Benites Negrón

Margot Cabrejo Mendoza

Buenaventura Ingenieros S.A.

joliveira@bisa.com.pe;

dbenites@bisa.com.pe;

mcabrejo@bisa.com.pe

Resumen

La caracterización tecnológica de las diseminaciones de oro por microscopía electrónica de barrido con microanálisis dispersa, nos da informaciones acerca de la mineralogía, asociaciones, tamaño y liberación de las partículas de oro en un determinado yacimiento. Estas informaciones son de gran importancia para definir el proceso metalúrgico del oro.

En el trabajo se muestran estudios de diseminaciones de oro (nativo y electrum) con tamaño de partícula en el rango de 1 – 5 micrones en los minerales: sulfuros (pirita, esfalerita y calcopirita); sulfosales (tetraedrita y pirargirita) y telururo (hessita). Los estudios fueron realizados en un microscópico electrónico de barrido acoplado al sistema de microanálisis empleando los métodos de análisis: *Puntual, Lineal y Areal*.

En algunos casos el oro puede ser recuperado por flotación directa y aplicando los procesos de Gravimetría o Cianuración, y en otros casos, como por ejemplo, oro diseminado en la pirita, se puede aplicar el proceso de Oxidación a Alta Presión y Temperatura (utilizando autoclaves), Tostación y seguido de Cianuración.

Abstract.

Technological characterization of gold dissemination by scanning electron microscopy with dispersive microanalysis give us details according to the mineralogy, associations, grain size, and mineral liberation of gold particles in a certain ore deposit. All this information is quite important in

order to define the metallurgical process gold will be treated.

This paper presents several studies regarding gold dissemination (both native gold and electrum) with a particle size between 1-5 microns in minerals such as: sulphides (pyrite, sphalerite and chalcopyrite); antimony sulphosalts (tetrahedrite and pyrargirite) and tellurides (hessite). The studies were carried out by using a scanning electron microscope connected to a microanalysis system, using the following methods: Punctual, linear and areal.

In some cases, gold can be recovered by direct flotation and by applying gravimetric or cyanuration methods, whilst others, such as gold disseminated in pyrite, can be used high temperature and oxidation process previous roasting and cyanuration.

1. Introducción

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un equipo que permite la observación y caracterización superficial de diversos materiales entre los que se pueden mencionar: minerales, cerámicos, aleaciones y polímeros, permitiendo dar informaciones morfológicas del material analizado. Las principales características del SEM son la alta resolución (~100 Å), el aumento (50 mil x), la gran profundidad de campo que le da la apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

El SEM puede contener diversos detectores: Electrón Secundario para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), Electrón Retrodispersado que permite la obtención

de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) que permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis (Puntual, Areal y Lineal) y obtener imágenes de la distribución de elementos en superficies pulidas ^(1,2).

El oro es susceptible de existir en ambientes geológicos como: rocas sedimentarias, vetas intraplutónicas o periplutónica. Como diseminaciones (en tamaños de 0.1 – 10 micrones) o como inclusiones, microvenillas, rellenos de intersticios y reemplazamientos; pueden existir en yacimientos de rocas dolomíticas o carbonáceas, yacimientos de auríferos, donde se encuentran minerales de diversas formas, como por ejemplo: sulfuros de hierro (pirita, arsenopirita y pirrotita), telururos, arseniatos, antomoniatos y sulfuros básicos de plomo, cobre y zinc, de difícil recuperación por procesos convencionales (lixiviación directa)

Mayormente el proceso de cianuración de estos minerales necesita largos periodos de lixiviación y, bajas recuperaciones de oro. En algunos casos de recuperación se emplean la cianuración oxidante a presión en una sola etapa. Tales son los casos de la oxidación a presión y temperaturas elevadas.

2. Objetivos

Caracterizar la mineralogía de muestras de rocas con minerales de sulfuros (Pirita, Esfalerita, Calcopirita), sulfosales (Tetraedrita y Pirargirita) y telururos (Hessita) con diseminaciones de oro (Nativo y Electrum) por microscopía electrónica corroborado con análisis mineralógico, así también indicar un método más adecuado de recuperación de oro, para cada mineral.

3. Materiales y Métodos

Las muestras de rocas fueron cortadas y colocadas en briquetas de 4 mm de diámetro que después de pulidas fueron analizadas por microscopía electrónica y microscopía óptica.

En los análisis de microscopía electrónica se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido marca Tescan con Detector de Rayos X (SDD) Bruker modelo Quantax X-Flash 5010.

Los análisis elementales comprendieron la determinación de los elementos entre berilio y uranio, reportándose los valores en porcentaje en peso de cada elemento (Wt%) normalizado.

Para los análisis mineralógicos se utilizó el microscopio óptico marca Olympus modelo BX51. Esta técnica es de suma importancia ya que comprende la etapa previa al diseño de cualquier proceso de tratamiento metalúrgico que se quiera dar.

4. Resultados y Discusiones

a) Diseminaciones de Oro en Sulfuros

En la Tabla 01 se muestra el promedio, en porcentaje, de la composición química elemental obtenida por microanálisis (Análisis puntual) para los minerales: Pirita, Esfalerita, Calcopirita, Bornita, Arsenopirita y Galena, con la presencia de oro en el rango de 0.7 – 1.9%, en las muestras estudiadas. El oro en esos minerales se aprecia en forma nativa como diseminaciones de 1 – 5 micrones.

Tabla N° 01. Composición química (%) de los minerales identificados como Sulfuros.

Mineral	Composición Química (%)							Total
	Au	As	Fe	Pb	Cu	Zn	S	
Pirita	1.9		40.3				57.9	100
Esfalerita	1.1		9.2			46.3	43.4	100
Calcopirita	1.6		32.0		21.5		44.9	100
Bornita	1.5		11.6		57.7		29.3	100
Arsenopirita	0.7	41.0	28.9				29.5	100
Galena	0.8			84.5			14.8	100

En las Figuras 01 a 04 se presentan imágenes con Análisis areal y lineal de oro diseminado en la Pirita, Esfalerita, Calcopirita y Bornita. La recuperación del metal precioso, depende de su ley.

De acuerdo con la literatura existen diversos procesos de tratamiento para extraer el oro de

estos minerales previo a cianuración, como por ejemplo: la Tostación que consiste inicialmente en moler la mena hasta cierto tamaño de partícula para liberar los minerales de interés y tostarlos a temperaturas por encima de 500°C, con la finalidad de oxidar a los sulfuros y convertirlos en sulfatos solubles (por la presencia de un reactivo oxidante - catalizador)^(3, 4).

Otro proceso alternativo sería la Lixiviación en autoclave, que se realiza a temperatura y presión elevada para obtener la oxidación y solubilidad del azufre y su separación.

El producto obtenido por esta técnica es una solución ácida en que los metales del mineral son solubles. Posteriormente, se efectúa la

neutralización para en seguida realizar la cianuración.

La Tostación de la Arsenopirita puede ser hecha bajo condiciones controladas de temperaturas mediante oxidación parcial u oxidación total, dependiendo de las características de la mena. Debido a la formación del óxido de arsénico altamente volátil y tóxico, producto de la oxidación del arsénico, se evita la formación del pentóxido de arsénico no volátil.

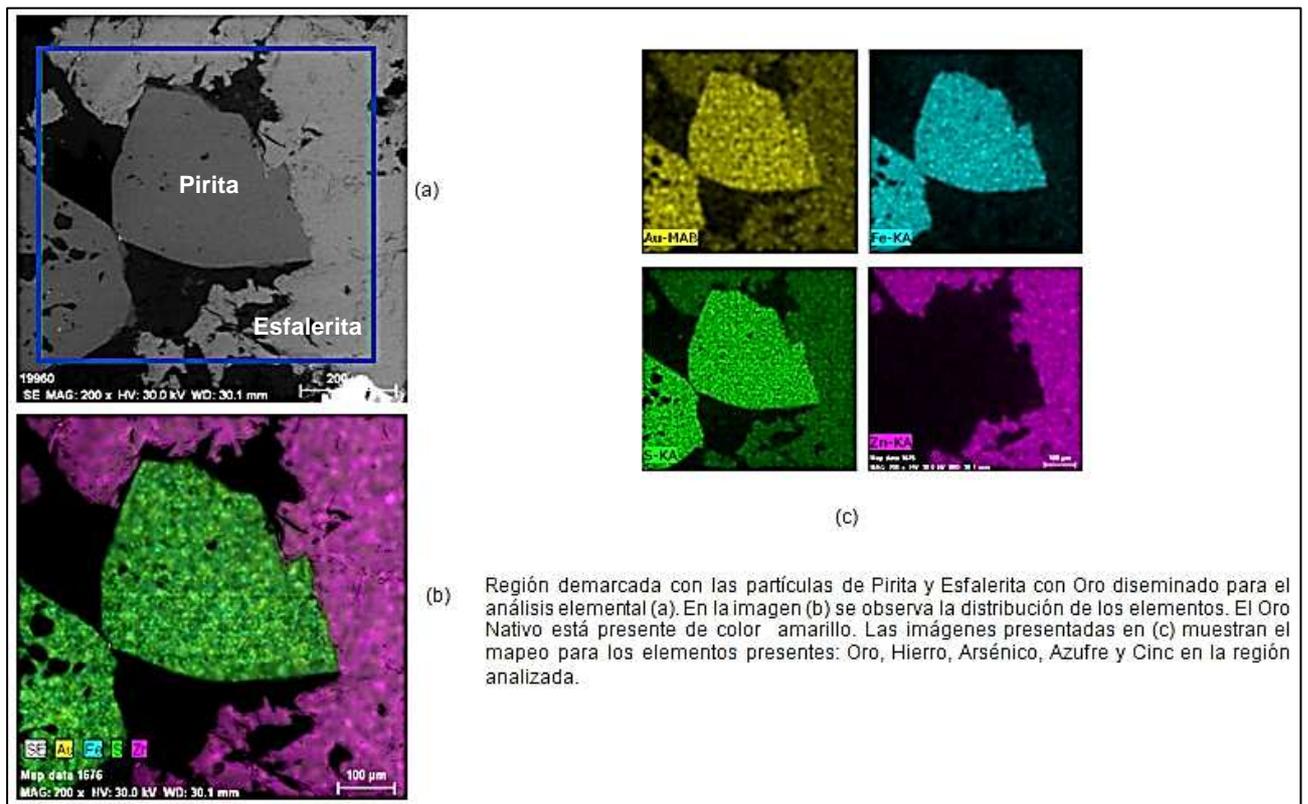


Figura 01. Análisis areal de las partículas de Pirita y Esfalerita con diseminaciones de oro nativo.

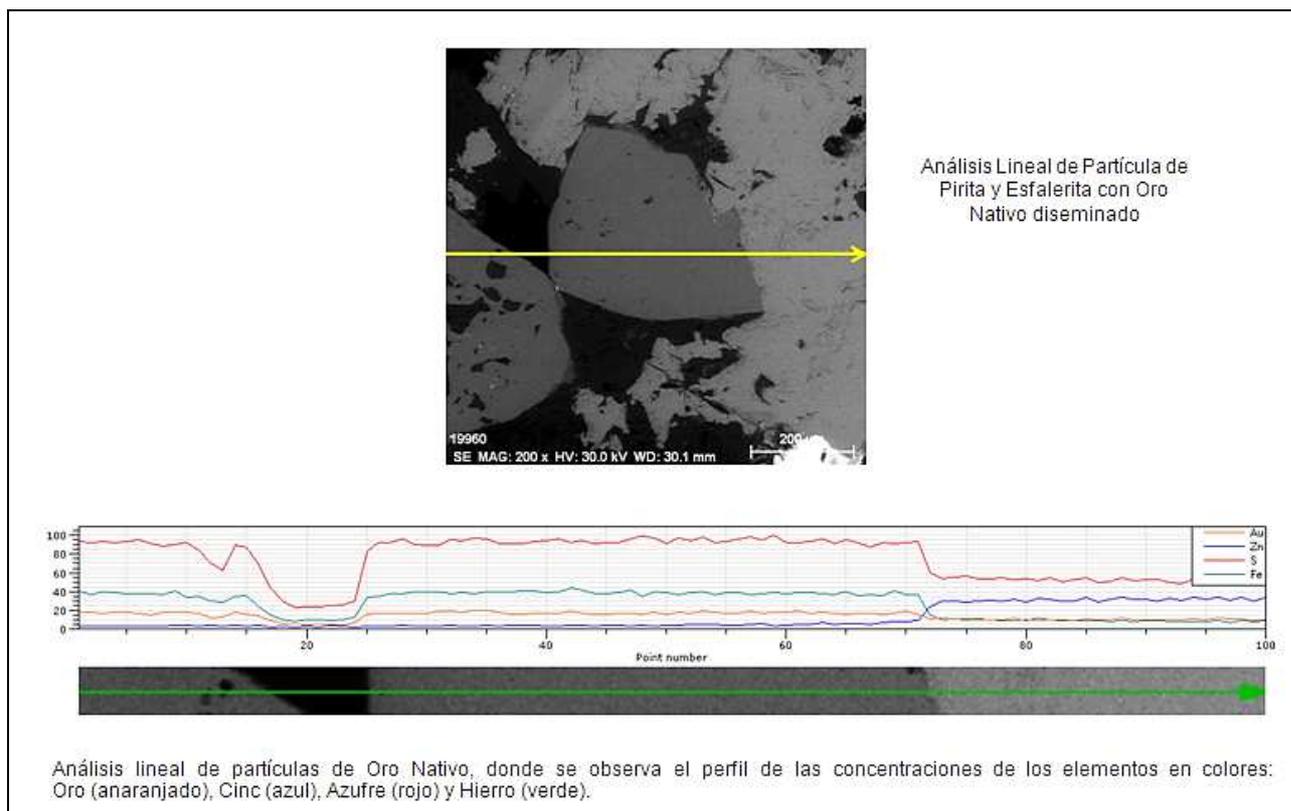


Figura 02. Análisis lineal de las partículas de Pirita y Esfalerita con diseminaciones de Oro nativo.

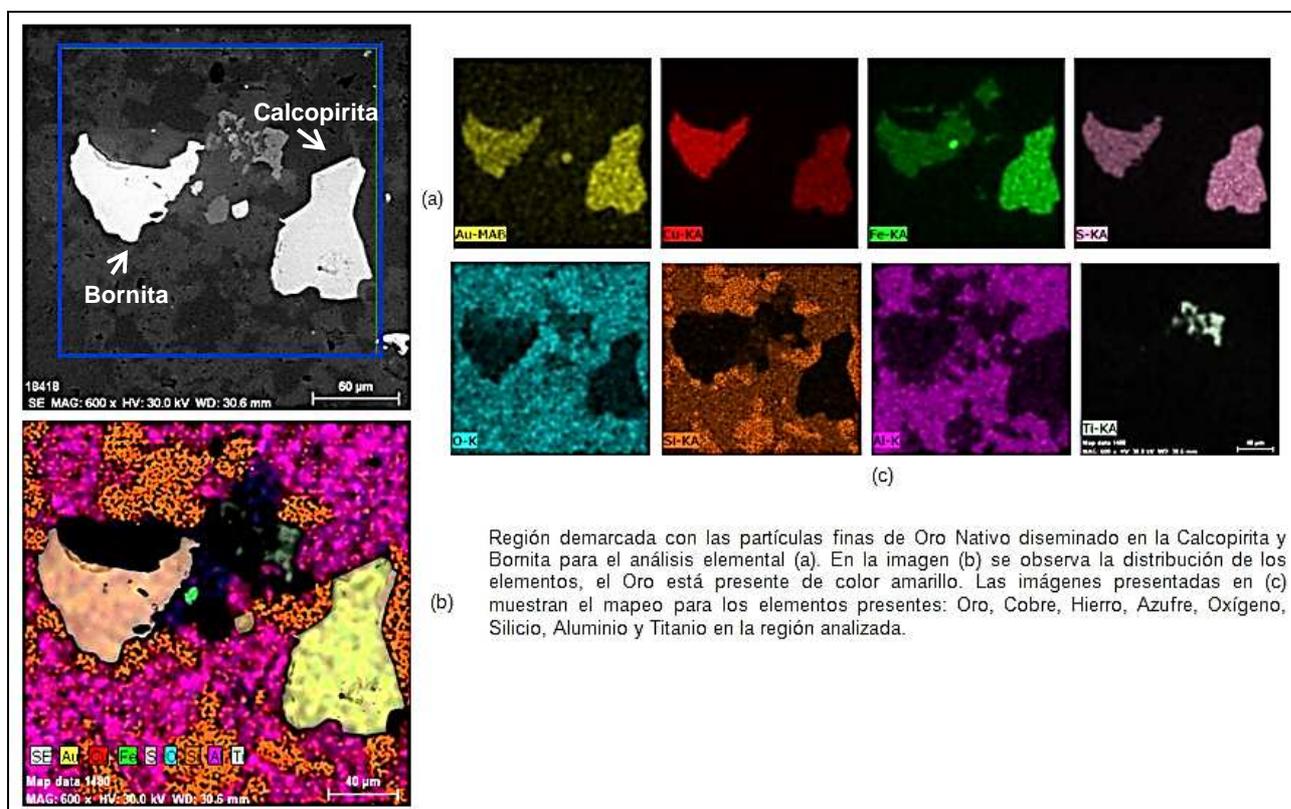


Figura 03. Análisis areal de las partículas de Bornita y Calcopirita con diseminaciones de oro nativo.

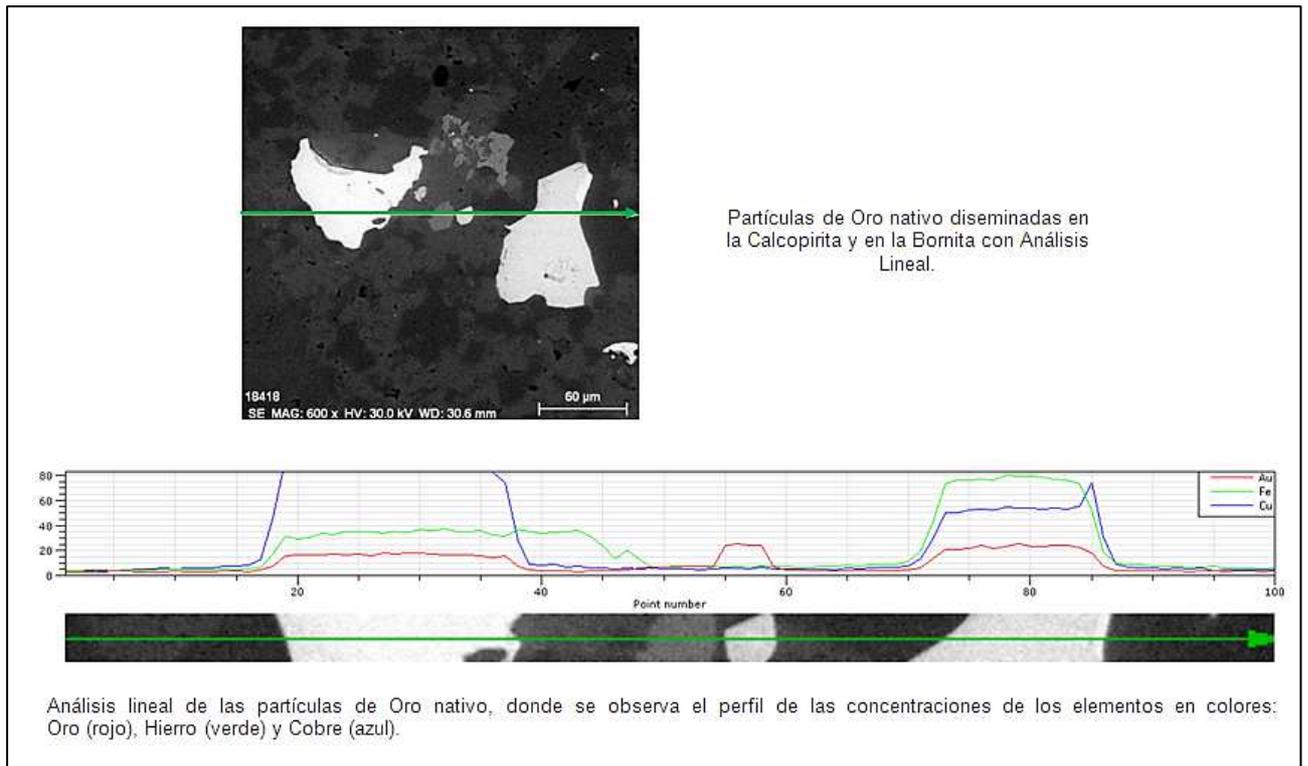


Figura 04. Análisis lineal de las partículas de Bornita y Calcopirita con diseminaciones de Oro nativo.

a) Diseminaciones de Oro en Sulfosales

En la Tabla 02 se muestra el promedio, en porcentaje, de la composición química elemental obtenida por microanálisis (análisis puntual) para los minerales: Tetraedrita, Pirargita y Enargita con diseminaciones de oro nativo y/o electrum.

Tabla N° 02. Composición química (%) de los minerales identificados como Sulfosales.

Mineral	Composición Química (%)							Total
	Au	Ag	As	Sb	Cu	Zn	S	
Tetraedrita	2.0	3.4	4.2	26.4	31.0	5.1	28.0	100
Pirargirita	3.5	48.3		31.7			16.5	100
Enargita + Electrum	30.0	10.0	15.0		25.0		20.0	100

En las Figuras 05 y 06 se presentan imágenes con Análisis areal de oro diseminado en la Tetraedrita y Pirargirita.

En la recuperación del oro en la Tetraedrita y Enargita + Electrum se puede aplicar los métodos de la tostación parcial o total, con los controles de temperatura, como el caso de la menas de Arsenopirita mencionado anteriormente.

En el caso de la Pirargirita se recomienda tostar en una atmósfera oxidante para provocar la volatilización de compuestos de antimonio (como antimonitos que son extremadamente perjudiciales para la cianuración) en la forma de óxido favoreciendo la formación del vidrio de antimonio.

En los casos de menas de minerales de baja ley, la Lixiviación Bacteriana es también un proceso indicado. En ese proceso se emplea las bacterias quimilíto tróficas del azufre, que se oxidan en ese elemento produciendo ácido sulfúrico que solubiliza los metales mezclados con azufre. Es una técnica simple de bajo costo y ecológicamente limpia.^(4,6)

Un ejemplo clásico empleando en esta técnica, sería la lixiviación de minerales sulfurosos

como la Pirita mediante la acción de bacterias tales como la Thiobacillus ferrooxidans y la Thiobacillus thiooxidans que se cultiva en la Pirita como fuente de energía. Estas bacterias sintetizan un mucopolisacárido cuando está adherido al mineral, lo que favorece la oxidación del azufre para solubilizar el metal del mineral.

Estudios por microscopía electrónica revelan que estas bacterias se adhieren preferencialmente a la zona de concentración del azufre para usarlo como fuente de energía y generar la capa microporosa soluble que cubre la superficie del sulfuro^(4,5).

b) Diseminaciones de Oro en Teleruros

En la Tabla 03 se muestra el promedio, en porcentaje, de la composición química elemental obtenida por microanálisis (análisis puntual) para el Hessita (teleruro) con diseminaciones de oro nativo reemplazando a la Tetraedrita que se aprecia también con oro diseminado. Las partículas de Au se encuentran en el rango de 2 – 10 micrones.

En las Figuras 07 y 08 se observa la distribución elemental obtenidos por los análisis Areal y lineal para la Tetraedrita y Hessita.

Tabla Nº 03. Composición química (%) de la Hessita.

Mineral	Composición Química (%)							Total
	Au	Ag	Te	Pb	Fe	Cu	Bi	
Hessita	4.8	58.4	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100

Se sabe que los teleruros son de difícil disolución en soluciones de cianuros. Una alternativa sería hacer una disolución en medio alcalino (Peróxido de Sodio) en paralelo a una aeración, con esto se obtendrá una descomposición de los teleruros, caso contrario, se procederá a una tostación preliminar al proceso de Cianuración.

La decisión de realizar el beneficio del mineral (su liberación), depende exclusivamente de la evaluación económica del mineral a procesar. Esta liberación pasa por una evaluación de Costo – Beneficio (basado en la ley del mineral; de acuerdo a estas decisiones, se aplican los procesos de extracciones adecuados.

El método más tradicional empleado en el tratamiento de los minerales con cierta cantidad significativa de oro y plata es la tostación oxidante de los concentrados de flotación que libera el azufre, produciendo una calcina porosa que se puede tratar posteriormente por cianuración. Por otro lado, esta técnica genera una gran cantidad de SO₂ y gases que contienen azufre, arsénico y antimonio que contaminan el medio ambiente. Sin embargo, estos gases pueden procesarse para la producción de H₂SO₄⁽⁵⁾.

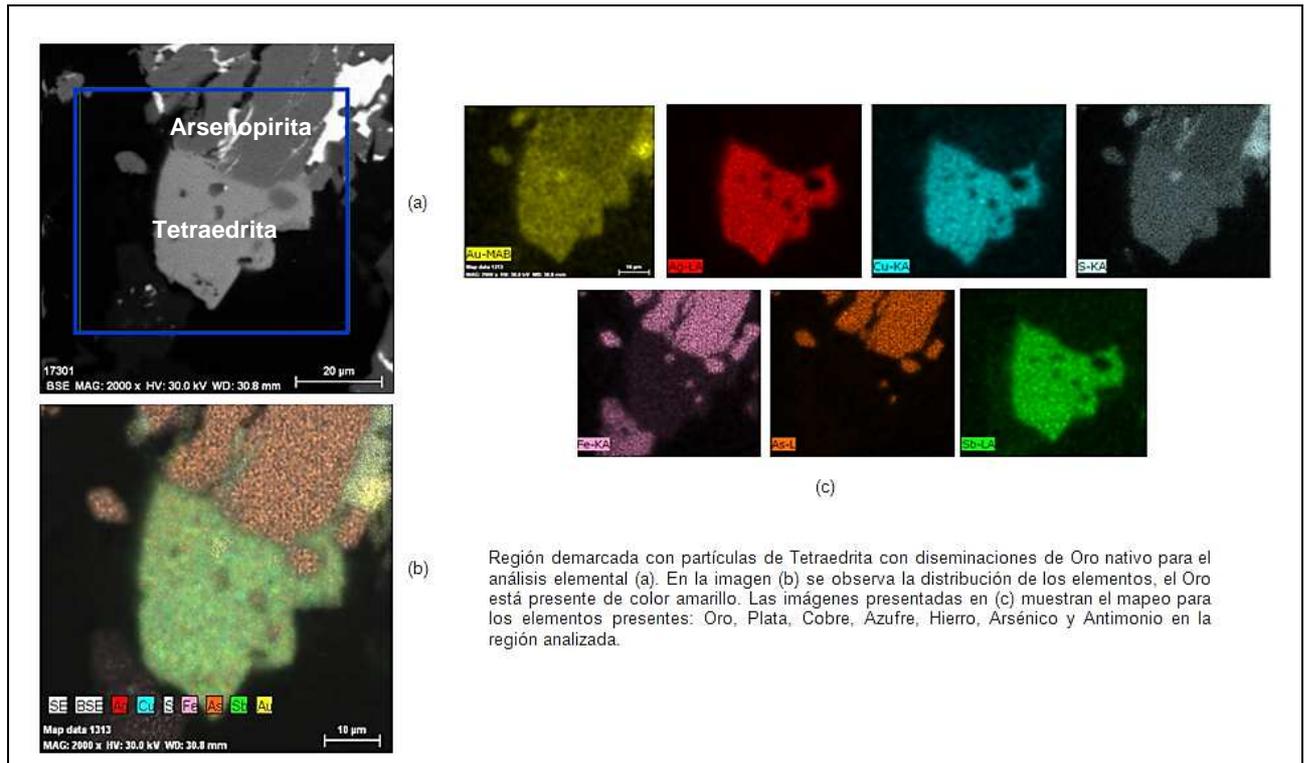


Figura 05. Análisis areal de las partículas de Arsenopirita asociada a la Tetraedrita con diseminaciones de Oro nativo.

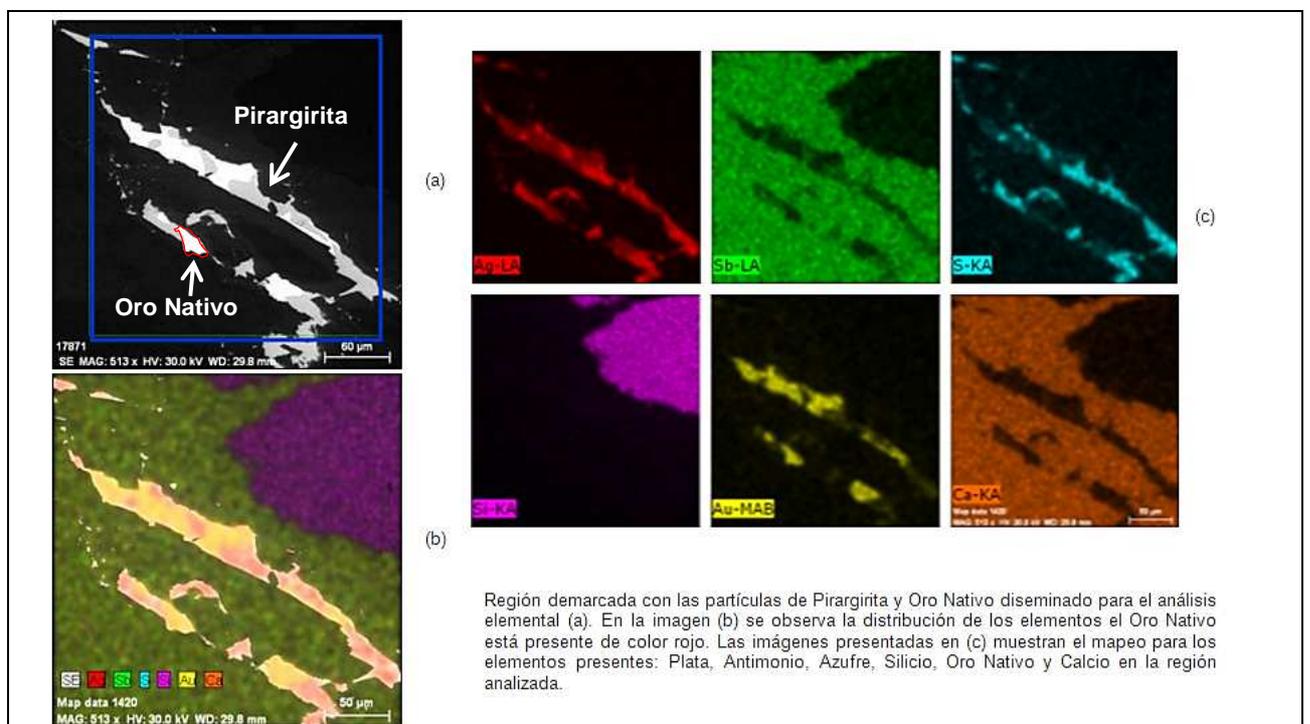


Figura 06. Análisis areal de las partículas de Pirargirita con diseminaciones de Oro nativo, rellenando microfracturas en Calcita.

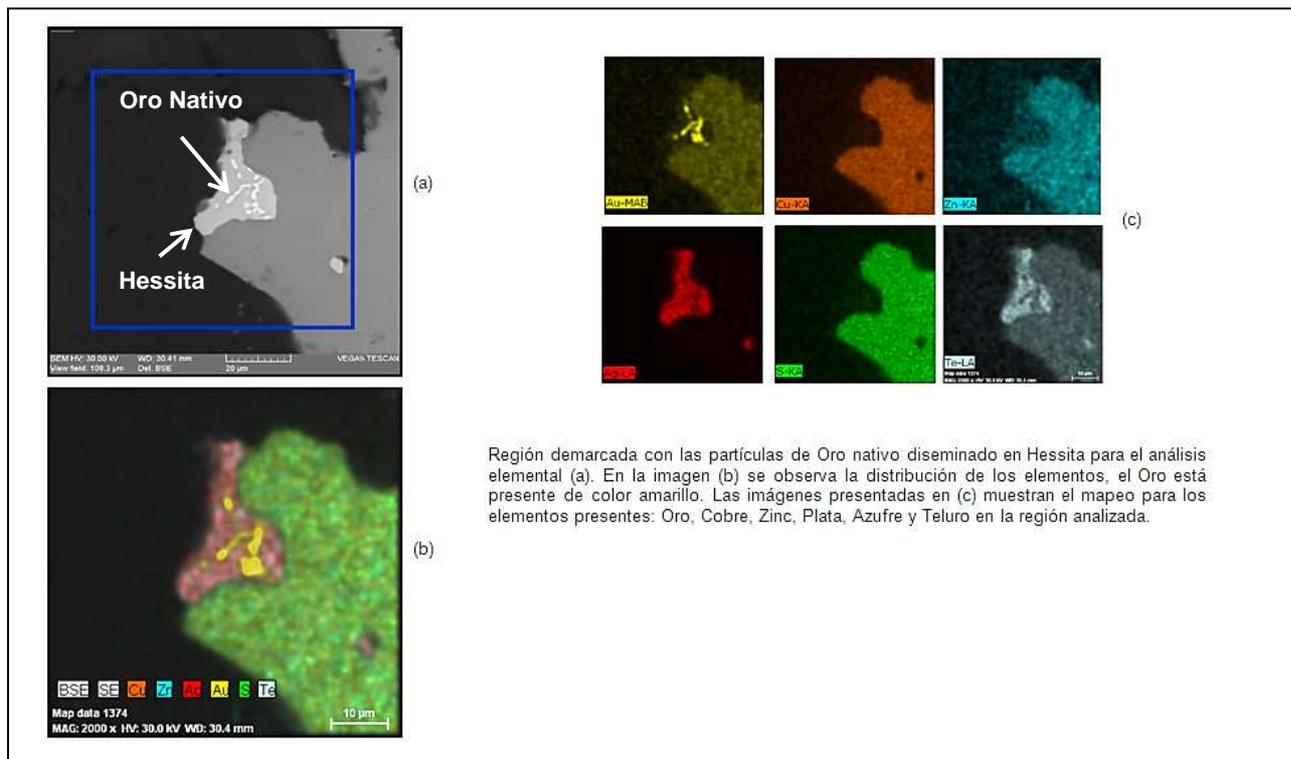


Figura 07. Análisis areal de las partículas de Hessita, con diseminaciones de Oro nativo, reemplazando a la Tetraedrita

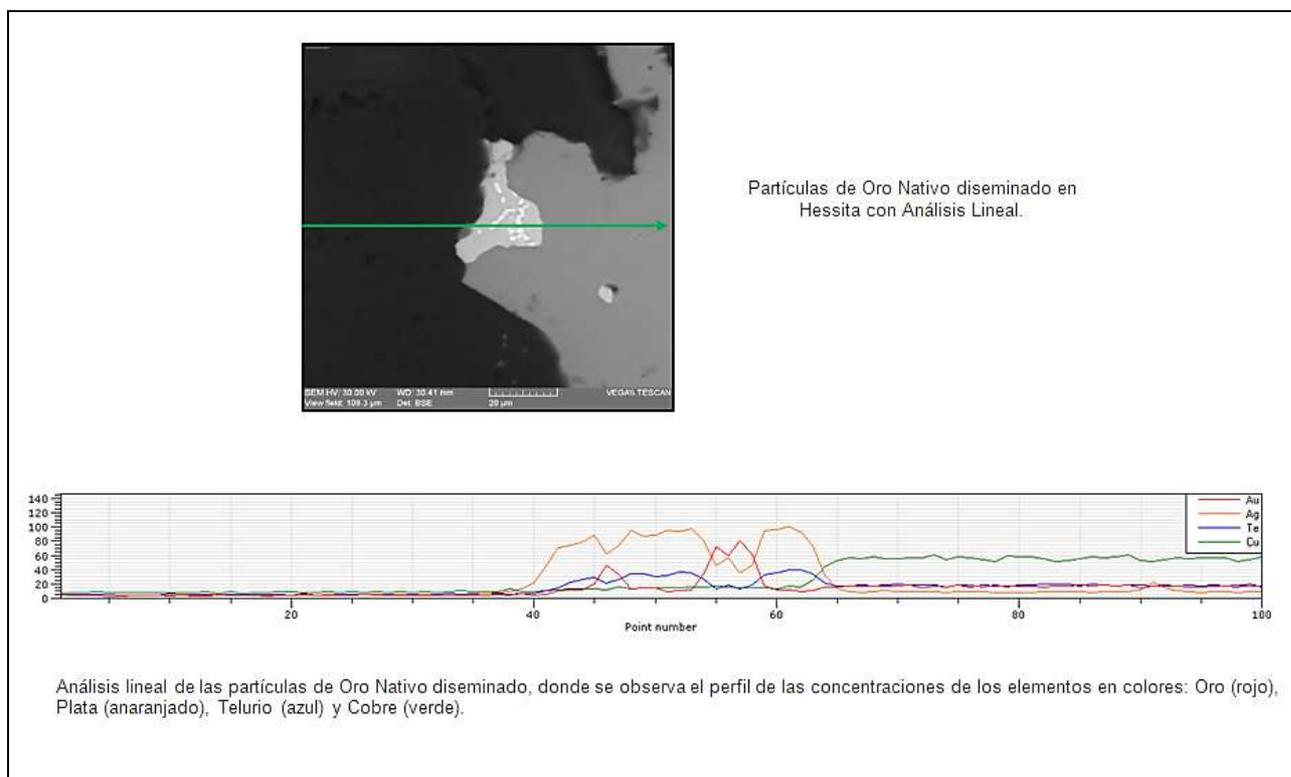


Figura 08. Análisis lineal de las partículas de Hessita con diseminaciones de Oro nativo.

c) Otros casos de diseminaciones de Oro

En las figuras 09, 11 y 12 se aprecia a la Pirita asociada a la Montbrayita que presenta inclusiones de Oro nativo con tamaños que se hallan dentro del rango de $4.35\mu\text{m}^2$ a $168.80\mu\text{m}^2$, incluido todo en minerales de ganga. Las imágenes fueron obtenidas con los análisis areal y lineal.

La Montbrayita es un mineral raro perteneciente al grupo de los Teleruros. El IMA reconoce la fórmula de la Montbrayita como $(\text{Au,Sb})_2\text{Te}_3$, lo cual implica que el Sb (hasta a un 7%) substituye al Au en su estructura. Además de estar asociada con otros teleruros, lo está con calcopirita, esfalerita y pirita. Si hay presencia de bismuto, el antimonio puede estar ausente.

En esto caso, la liberación del oro podría también ser hecha por el proceso de Tostación, bajo el control de las condiciones oxidantes, previa separación de la Pirita por los procesos de molienda y flotación.

El Oro nativo también puede estar asociado y diseminado en Bismutinita, como se presenta en las imágenes 10 y 13, donde se aprecia al Oro con tamaños de partículas de $15 - 113\mu\text{m}^2$,

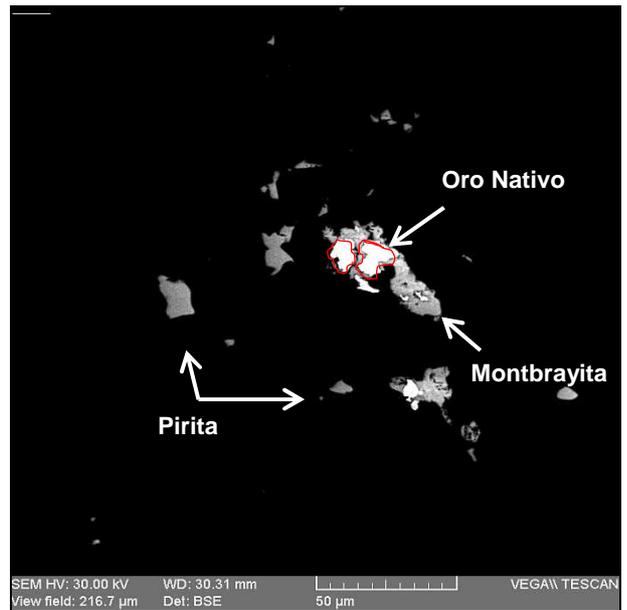


Figura 09. Partículas de Oro Nativo diseminadas en la Montbrayita, junto a la Pirita, incluidas en la ganga.

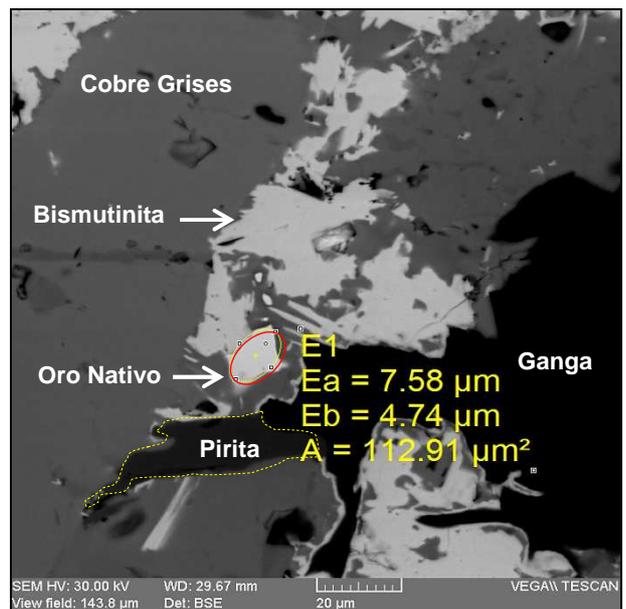


Figura 10. Partículas de Oro Nativo diseminadas en la Bismutinita con área de $112.91\mu\text{m}^2$.

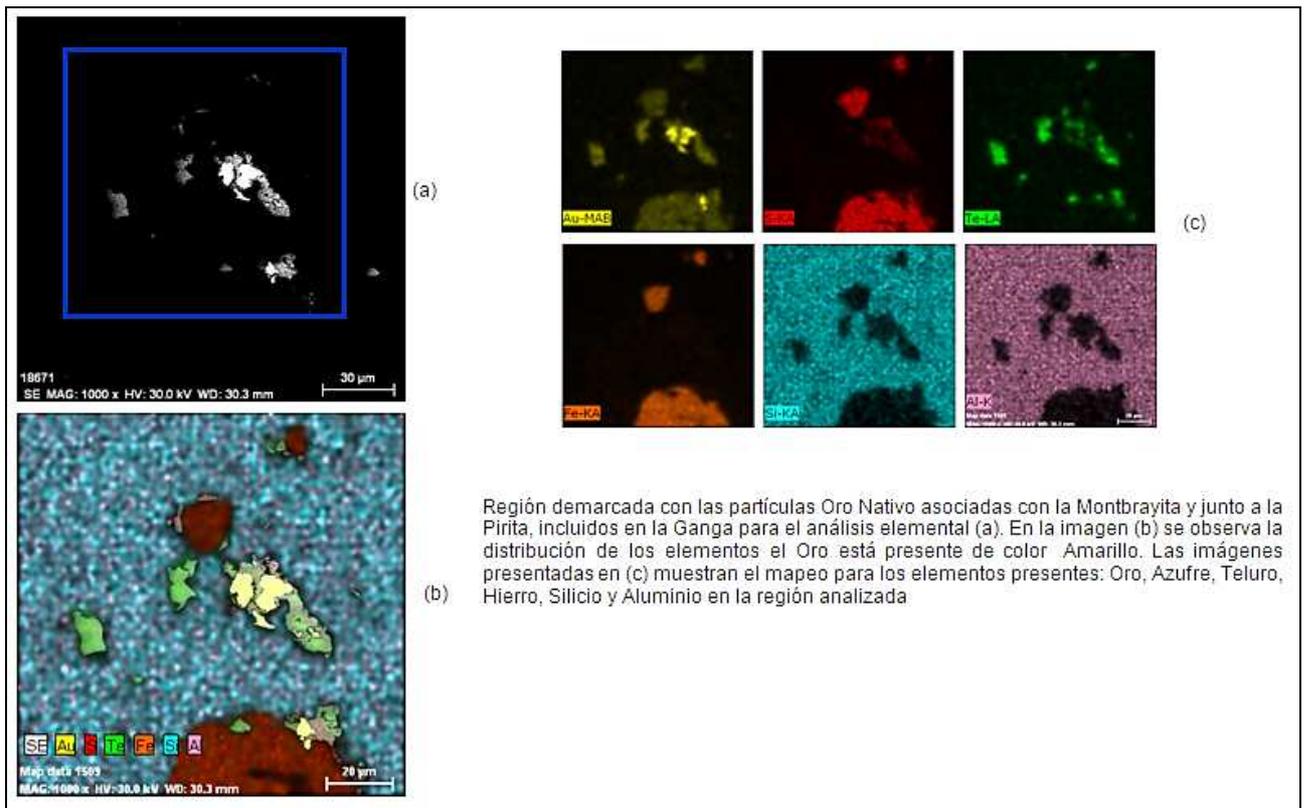


Figura 11. Análisis areal de las partículas de Montbrayita con disseminaciones de Oro nativo en minerales de ganga.

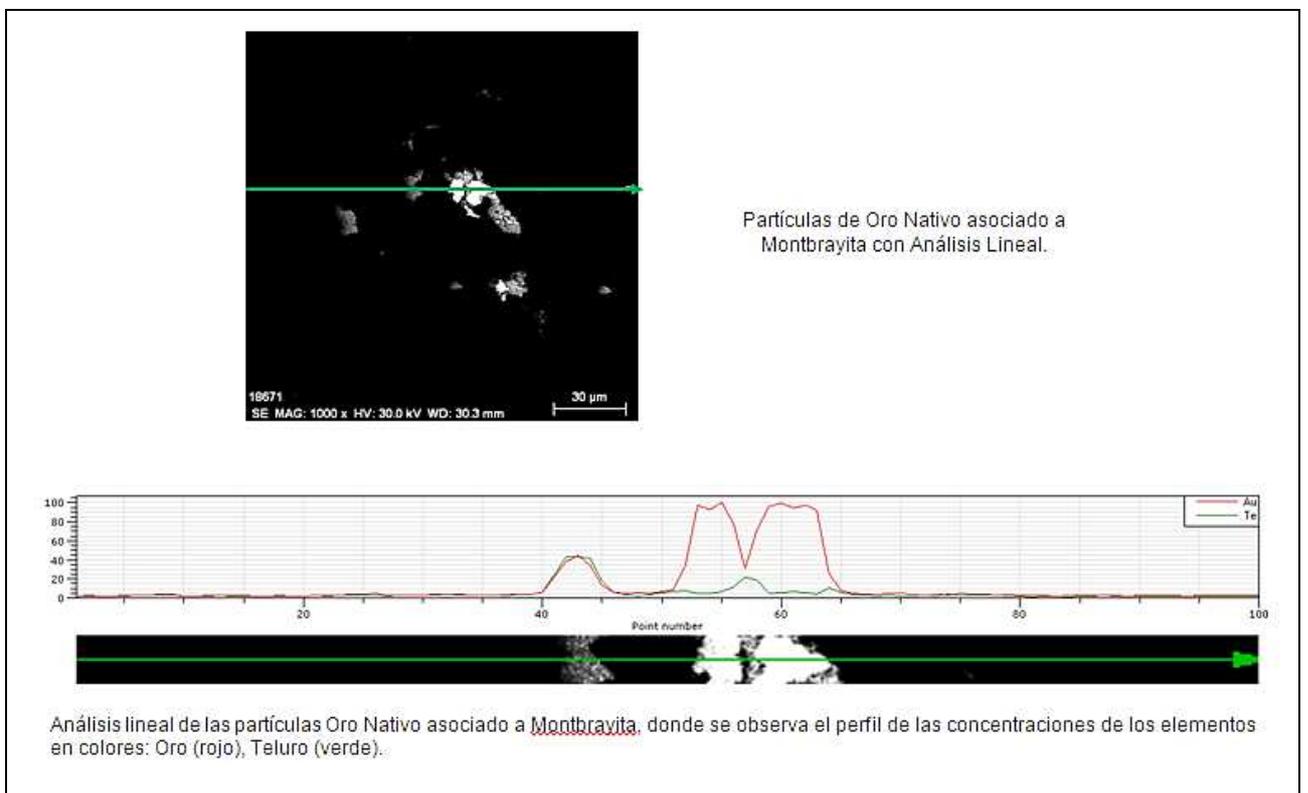


Figura 12. Análisis lineal de las partículas de Montbrayita con disseminaciones de Oro nativo en minerales de ganga.

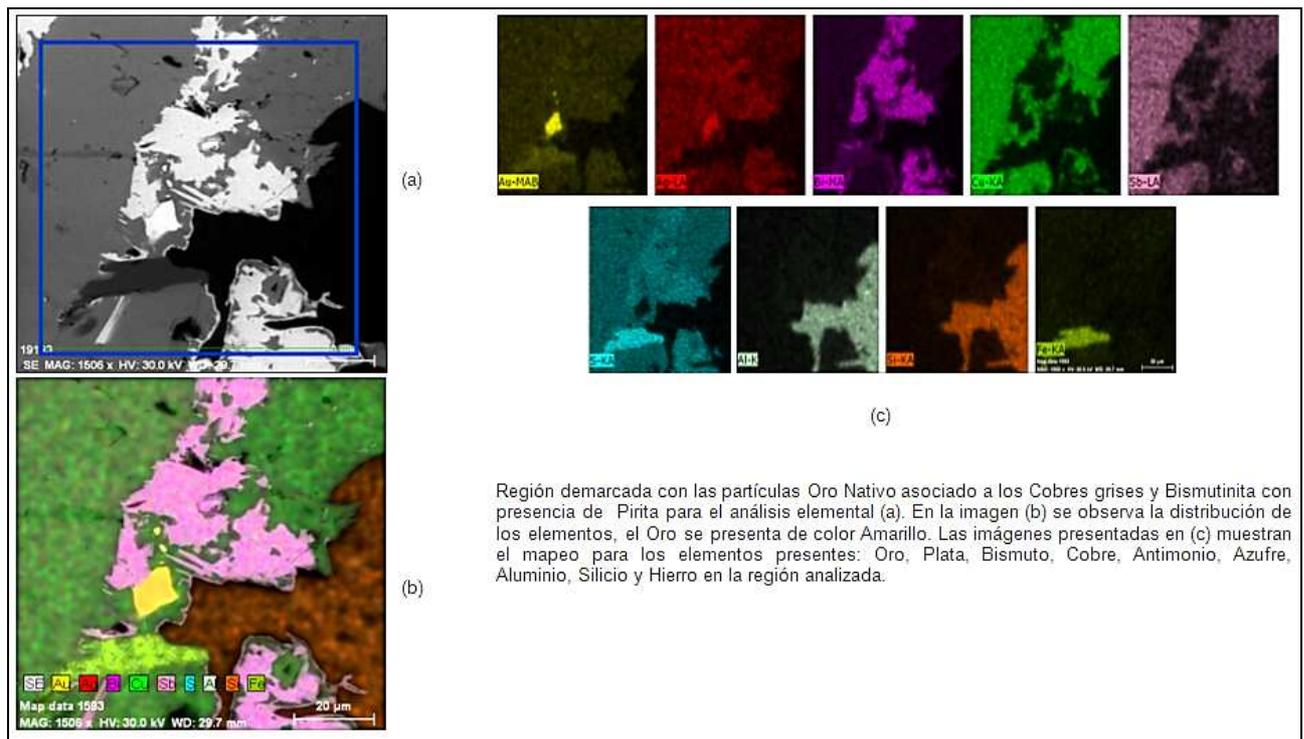


Figura 13. Análisis areal de las partículas de Oro nativo asociado a Cobres Grises.

5. Conclusiones

Como se mencionó líneas arriba, el estudio de microscopía electrónica de barrido con microanálisis dispersiva, es una de las técnicas más indicada para analizar e identificar oro refractario diseminado (en forma nativa y electrum) en diferentes ambientes mineralógicos. La técnica nos brindará informaciones acerca de la composición química, asociaciones mineralógicas, tamaño de partículas y grado de liberación del mineral de valor económico.

La decisión de realizar el beneficio de oro diseminado (su liberación), depende exclusivamente de la evaluación económica de la mena a procesar. Esta liberación debe pasar por una evaluación de Costo – Beneficio (basado en la ley del oro); de acuerdo a estas decisiones, se emplearán los procesos de extracciones adecuados.

La lixiviación por presión en autoclaves para mineral de oro refractario, actualmente es el proceso más empleado por las grandes

empresas mineras del mundo. Ésta ha sido desarrollada en un procedimiento operativo estándar. El trabajo de pruebas es realizado en el laboratorio, o en una operación de planta piloto continua.

6. Referencias

- 1) J. F. O, Ugarte y A. A. Vercelli, PERUMIN – 30 Convención Minera, Arequipa – Perú (2011).
- 2) L. Reimer, Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis, P. 45, Ed. Springer (1998).
- 3) W. Eugene and A. Mujumdar, P. 21, Minerals, Metals and Materials Technology Centre, National University of Singapore (2009).
- 4) J. R. Parga y F. R. Carrillo, Rev. Metalurgica Madrid, 32 (4), 255 – 261 (1996).
- 5) V. A. Arce; R. C. Falcón; et al, Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG, 8 (16), 5 – 14 (2005).
- 6) A. Ortiz, Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG, 11 (22), 7 – 12 (2008).