

### III.8. RECUPERACIÓN DE METALES DE LODOS ANÓDICOS

#### III.8.1. Caracterización de los lodos anódicos

Como último ejemplo de la aplicabilidad del proceso METALLOZON<sup>®</sup> para la recuperación de metales, se ensayó con lodos anódicos de electrorrefinado de cobre. Estos lodos están principalmente constituidos de fases oxidadas conteniendo Cu, Ag, Pb, Se, Sb, As, Cl y una gran variedad de seleniuros conteniendo Ag, Cu y Te. El oro presente, probablemente se encuentra a nivel submicroscópico.

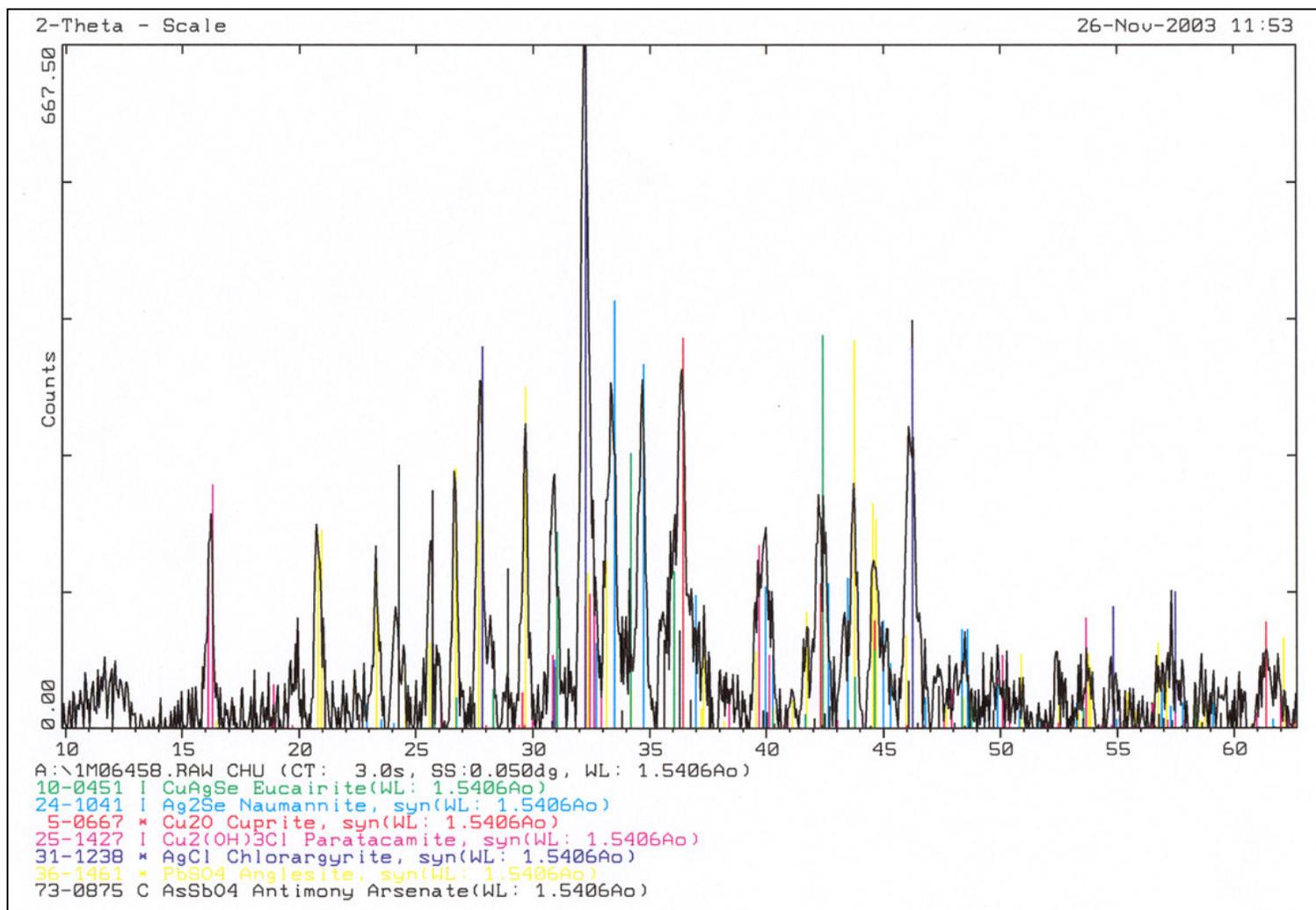
La muestra de lodos se caracterizó por ICP y por SEM/EDS. La composición del mismo se muestra en la tabla 73.

**Tabla 73.** Composición de los lodos anódicos empleados.

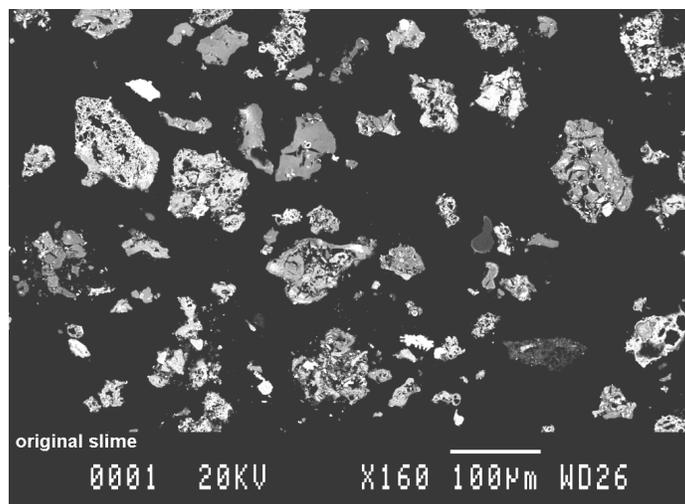
Cu	Ag	Au	Se	Te	As	Pb	Sb
32%	16%	0.08%	6.0%	1.0%	6.8%	3.1%	3.6%

La figura 186 muestra el espectro de XRD, detectándose como principales compuestos: Eucairita (CuAgSe), Naumannita (Ag<sub>2</sub>Se), Cuprita (Cu<sub>2</sub>O), Paratacamita (Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl), Clorargirita (AgCl), Anglesita (PbSO<sub>4</sub>) y Arseniato de antimonio (AsSbO<sub>4</sub>).

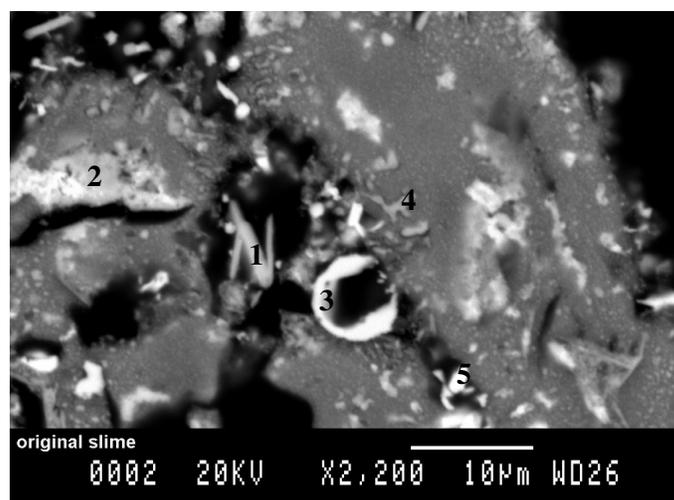
Las figuras 187 y 188, corresponden a imágenes de los lodos anódicos originales, obtenidas por microscopía electrónica de Scanning. El análisis por EDS confirma que se trata de una matriz extremadamente compleja (figura 189). Las figuras 190, 191, 192, 193, 194, 195 y 196, muestran los EDS obtenidos para los principales compuestos que componen los lodos.



**Figura 186.** Espectro de DRX correspondiente a la muestra de lodo anódico empleada en el estudio.



*Figura 187.* Imagen de lodo anódico original (BSE)



*Figura 188.* Imagen de lodo anódico original (BSE) (1. Fase oxidada Sb, As; 2. AgCl; 3. Seleniuros de Ag, Cu; 4. Fases oxidadas complejas conteniendo Cu, Ag, As, Sb, Pb, Cl y Se; 5. Seleniuro de Ag)

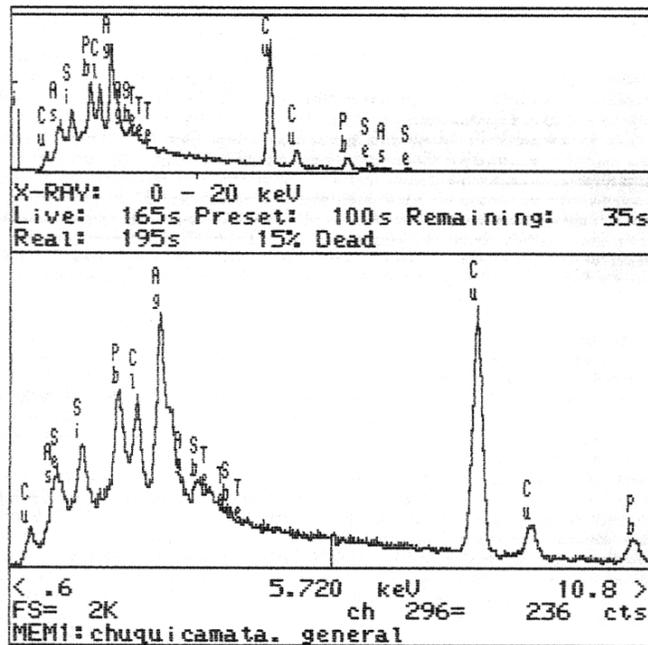


Figura 189. EDS correspondiente al lodo anódico original

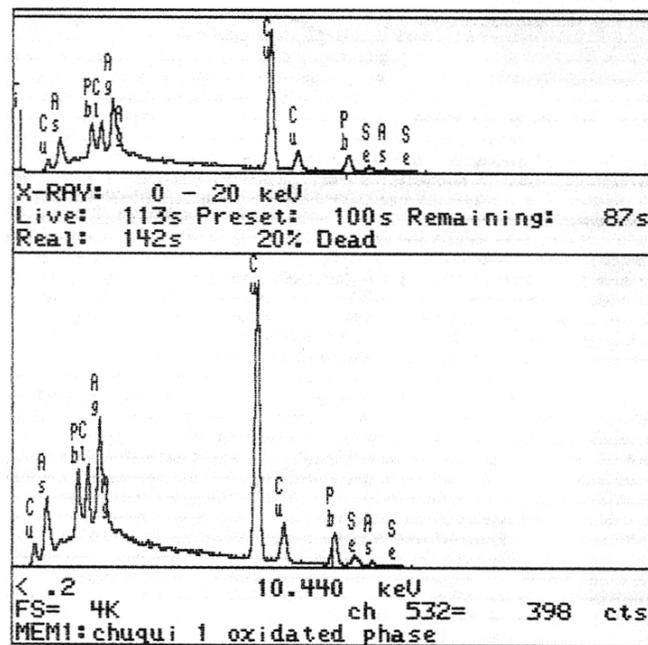
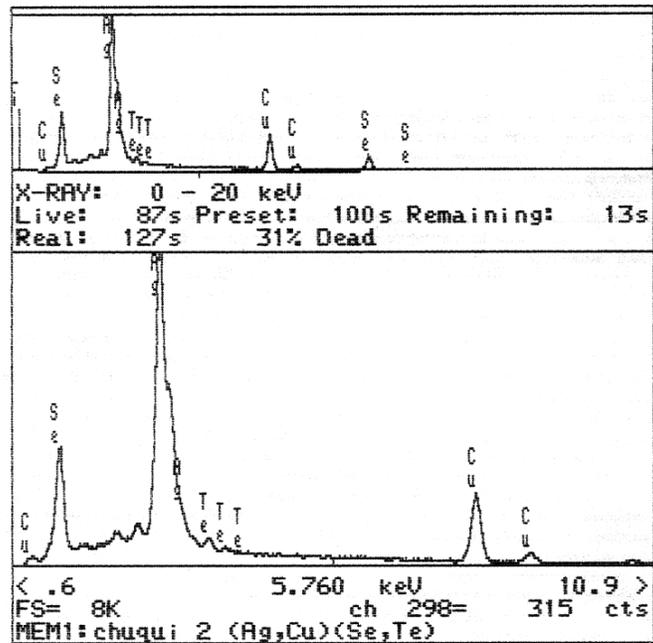
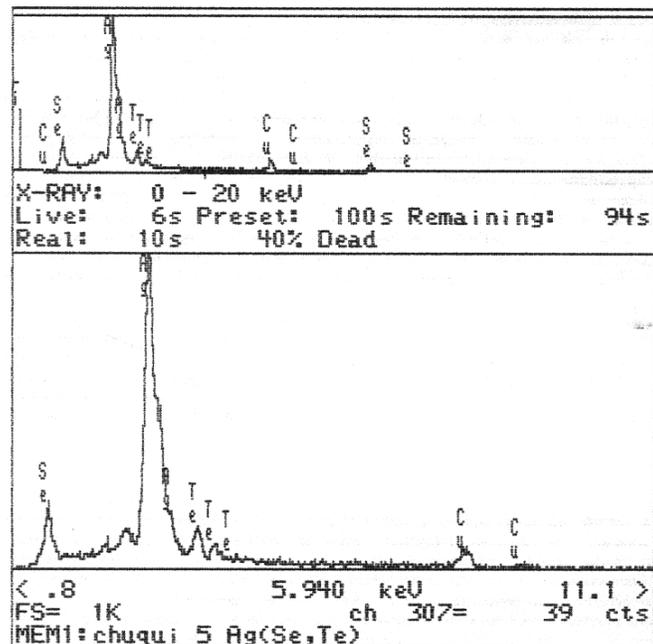


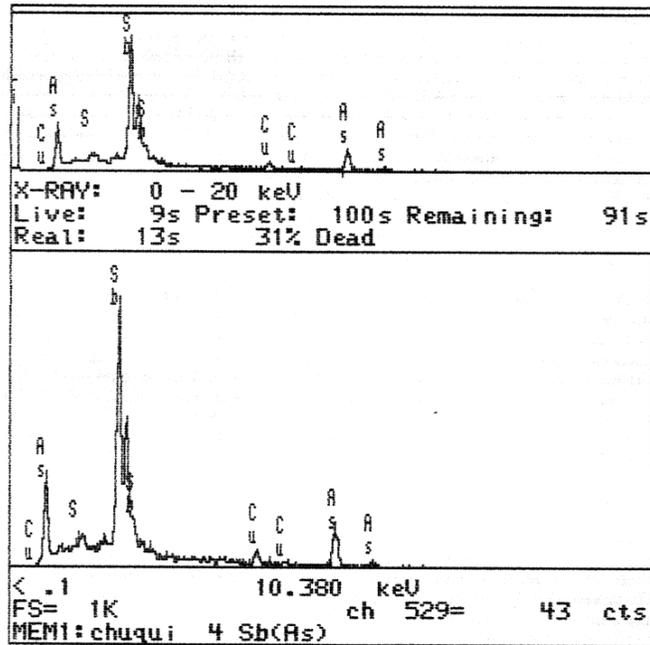
Figura 190. Espectro EDS correspondiente a las fases oxidadas complejas de Cu, Ag, As, Pb, Cl y Se (EDS correspondiente a la zona 4. de la imagen de la figura 188)



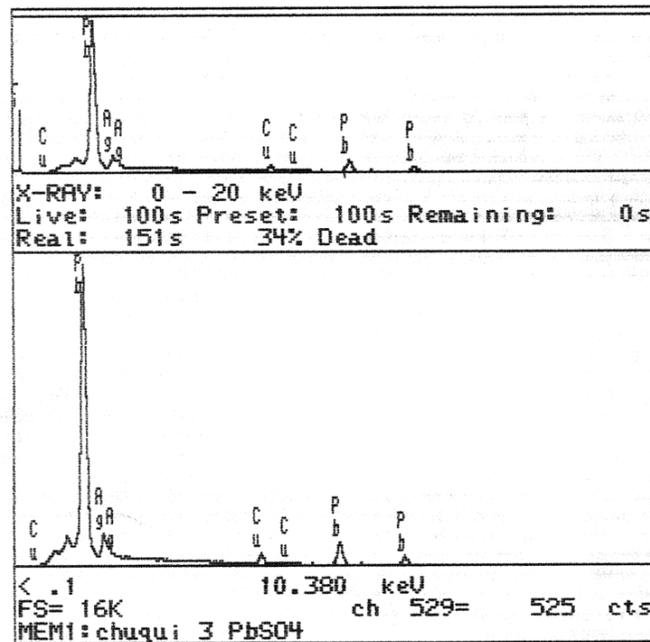
**Figura 191.** Espectro EDS correspondiente a seleniuros de cobre y plata. (EDS correspondiente a la zona 3. de la imagen de la figura 188)



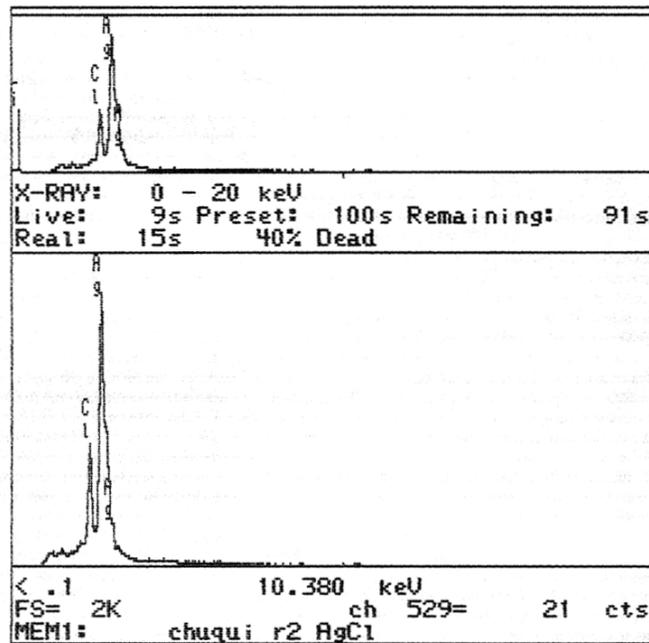
**Figura 192.** Espectro EDS correspondiente a  $(Ag_2Se)$  (EDS correspondiente a la zona 5. de la imagen de la figura 188).



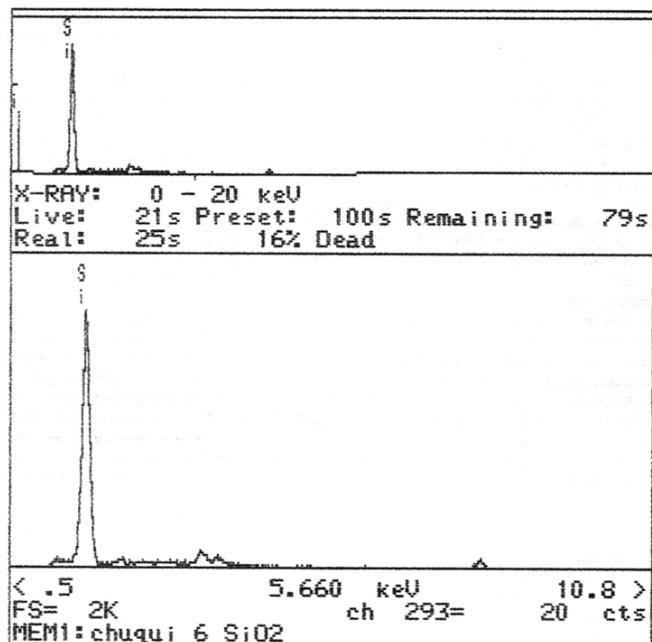
*Figura 193.* Espectro EDS correspondiente a la fase oxidada, rica en Sb, As. (EDS correspondiente a la zona **1**, de la imagen de la figura 188).



*Figura 194.* Espectro EDS correspondiente a PbSO<sub>4</sub>.



**Figura 195.** Espectro EDS correspondiente a AgCl. (EDS correspondiente a la zona **2.** de la imagen de la figura 188).



**Figura 196.** Espectro EDS correspondiente a sílice (SiO<sub>2</sub>)

### III.8.2. Resultados de lixiviación

Dado el contenido de Cu, Ag y Au, se llevaron a cabo las tres etapas de lixiviación consideradas en el proceso METALOZON<sup>®</sup>.

#### 1. Lixiviación con O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

La lixiviación del lodo anódico con oxígeno se realizó en las siguientes condiciones:

Masa del lodo anódico: 2.5g  
 Volumen de solución: 500 cm<sup>3</sup>  
 Temperatura: 24±1°C  
 [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]: 0.5M  
 Caudal de gases: 21.5 L/h  
 P<sub>O<sub>2</sub></sub>: 1 atm  
 Velocidad agitación: 900 min<sup>-1</sup>  
 Tiempo de lixiviación: 15 horas

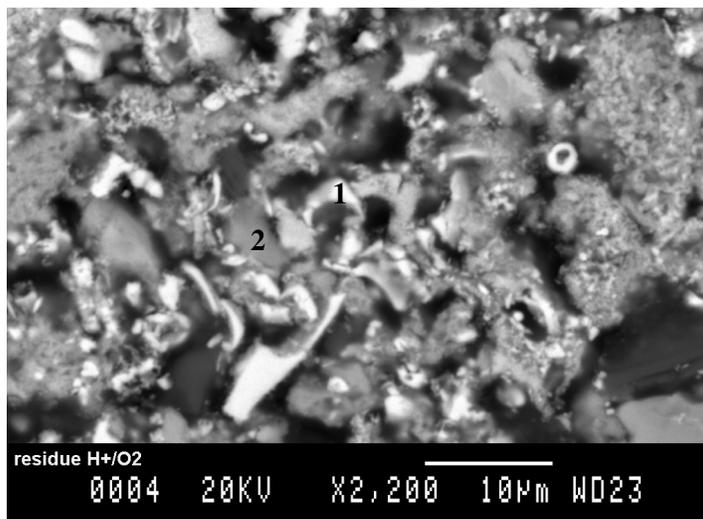
La tabla 74 muestra las extracciones finales, después de 15 horas de lixiviación con O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

**Tabla 74.** Porcentajes de extracción de Cu, Ag, Se, Te, Pb y Sb, correspondientes a la lixiviación con O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5M.

Cu	Ag	Se	Te	As	Pb	Sb
87%	<0.1%	0.2%	43%	96%	4%	37%

En esta etapa, se disolvió el 71% en peso del lodo anódico original, lo que supuso un incremento sustancial del contenido de metales preciosos en el residuo de ataque.

Durante esta etapa el arsénico y la mayoría del cobre son selectivamente disueltos. Aunque la cinética no es bien conocida, valores preliminares indican que la lixiviación del cobre es rápida, probablemente se completa en un tiempo de 15 minutos. La figura 197 muestra el aspecto del residuo de lixiviación, el cual contiene principalmente seleniuros de Ag(Te) y fases oxidadas de Ag, Sb, Pb y Se.



**Figura 197.** Imagen del residuo de lixiviación con  $O_2/H_2SO_4$  0.5M (BSE) (**1.** Seleniuros Ag (Te); **2.** Fases oxidadas de Ag, Sb, Pb y Se)

## 2. Lixiviación con $O_3/O_2/H_2SO_4$

El residuo sólido de la etapa anterior se lixivió durante 5 horas, con una corriente de 4.9% en volumen de ozono, en las siguientes condiciones:

Residuo sólido de lixiviación con  $O_2/H_2SO_4$

Volumen de solución:  $500\text{ cm}^3$

Temperatura:  $24\pm 1^\circ\text{C}$

$[H_2SO_4]$ : 0.5M

Caudal de gases: 21.5 L/h

$P_{O_3}$ : 0.049 atm;  $P_{O_2}$ : 0.95 atm

Velocidad agitación:  $900\text{ min}^{-1}$

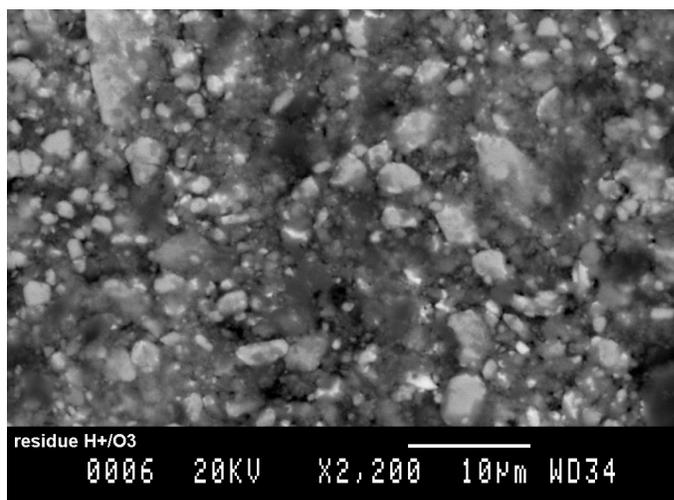
Tiempo de lixiviación: 5 horas

En esta etapa se produce la lixiviación selectiva de Ag y Se. Igualmente se completa prácticamente la lixiviación de Cu y Te, iniciadas en la etapa anterior. Como en el caso anterior, la cinética no es conocida, por lo que el proceso de extracción podría completarse en un tiempo inferior a las 5 horas.

La tabla 75, muestra las extracciones para los distintos componentes. Durante esta etapa, tiene lugar una pérdida del 23 % en peso, lo que significa que el residuo sólido únicamente representa el 6 % en peso del lodo anódico original. La figura 198, muestra el residuo de lixiviación.

**Tabla 75.** Porcentajes de extracción de Cu, Ag, Se, Te, Pb y Sb, correspondientes a la lixiviación con  $O_3/O_2/H_2SO_4$  0.5M.

Cu	Ag	Se	Te	As	Pb	Sb
13%	99%	99%	56%	3%	3%	14%



**Figura 198.** Imagen del residuo de lixiviación con  $O_3/O_2/H_2SO_4$  0.5M (BSE) (fases oxidadas de  $PbSO_4$ , óxidos de Sb,  $SiO_2$ )

### 3. Lixiviación con $O_3/O_2/HCl$

Filtrado el residuo sólido de la etapa anterior se lixivió bajo las siguientes condiciones:

Residuo sólido de lixiviación con  $O_3/O_2/H_2SO_4$

Volumen de solución:  $100\text{ cm}^3$

Temperatura:  $24\pm 1^\circ\text{C}$

[HCl]: 0.1M

Caudal de gases: 21.5 L/h

$P_{O_3}$ : 0.049 atm;  $P_{O_2}$ : 0.95 atm

Velocidad agitación:  $900 \text{ min}^{-1}$

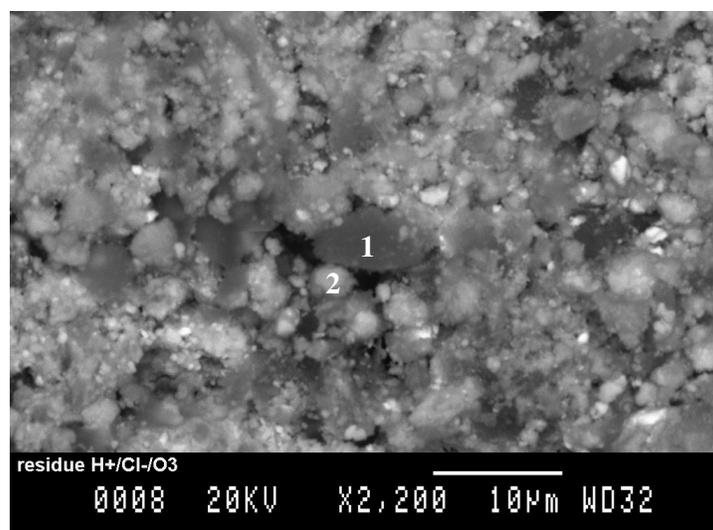
Tiempo de lixiviación: 3 horas

Como muestra la tabla 76, en esta etapa se produce la lixiviación selectiva del oro, aunque también se disuelve parte del plomo en el medio clorurado. El incremento de la relación sólido/líquido, podría reducir sustancialmente esta contaminación. Los experimentos se realizaron con muy baja densidad de pulpa, debido a la poca cantidad de muestra disponible.

**Tabla 76.** Porcentajes de extracción de Cu, Ag, Se, Te, Pb y Sb, correspondientes a la lixiviación con  $O_3/O_2/HCl$  0.1M

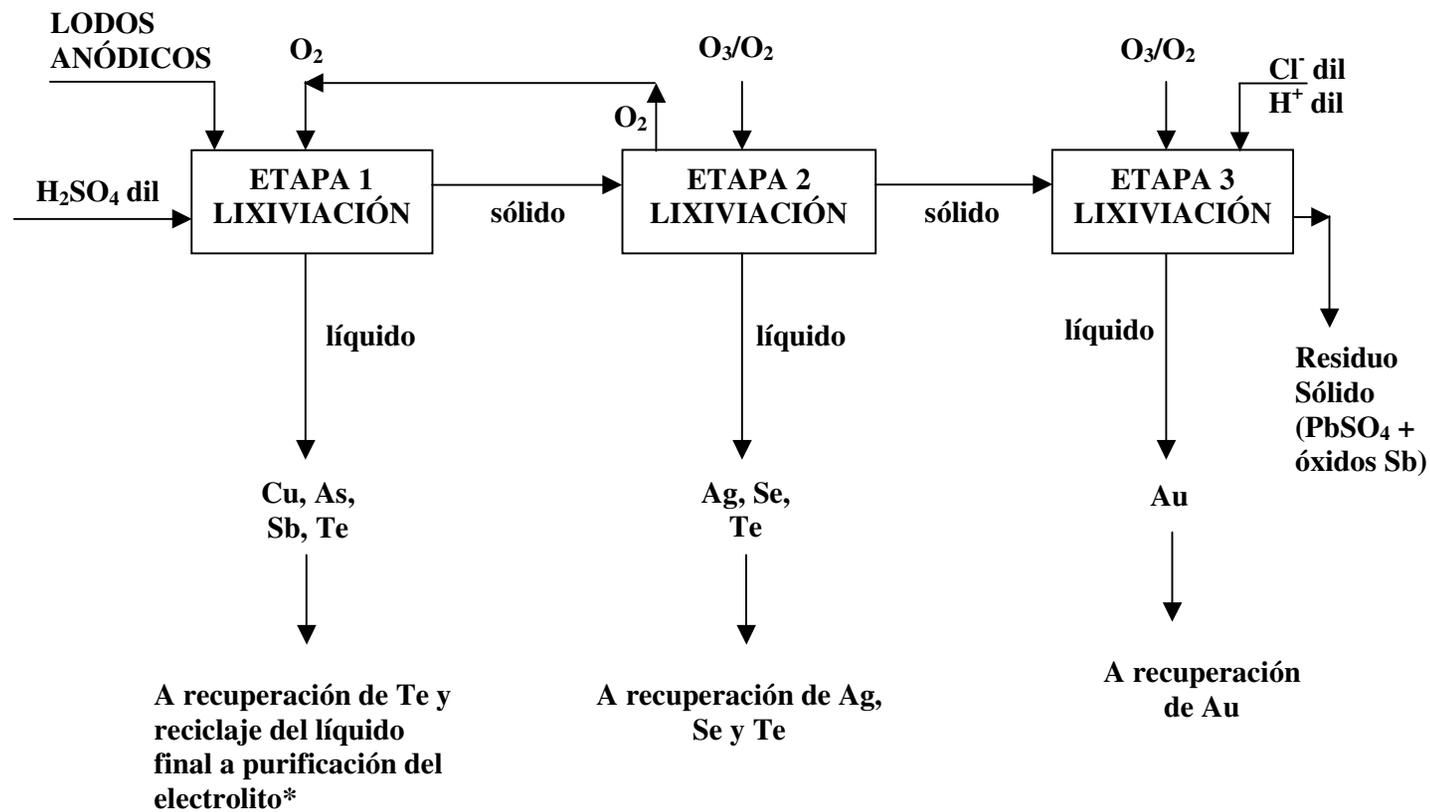
Cu	Ag	Au	Se	Te	As	Pb	Sb
<0.1%	<0.1%	>90%	<1%	1%	<1%	25%	<0.5 %

En la figura 199 se da una imagen general de residuo sólido final, el cual contiene sulfato de plomo, óxidos de Sb, sílica y algo de  $AgCl$ .



**Figura 199.** Imagen del residuo de lixiviación con  $O_3/O_2/HCl$  0.1M (BSE) (1.  $SiO_2$ ; 2.  $PbSO_4$ )

Finalmente, en la figura 200 se muestra el esquema de tratamiento de lixiviación propuesto para los lodos anódicos, destacando la necesidad de aplicar las tres etapas fundamentales del proceso METALOZON®.



**Figura 200.** Esquema de tratamiento de lixiviación para lodos anódicos. \* Electrolito empleado en el proceso de electrorrefinado de cobre.