

Recibido: 07 / 09 / 2009, aceptado en versión final: 28 / 10 / 2009

## Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro

Factors affecting the selection process to treatment gold complex minerals

**Angel Azañero Ortiz<sup>1</sup>, Pablo Antonio Núñez Jara<sup>1</sup>, Vidal Sixto Aramburú Rojas<sup>1</sup>, Elard Felipe León Delgado<sup>1</sup>, Lourdes Janet Quiñones Lavado<sup>1</sup>, Manuel Cabrera Sandoval, Luis Puente Santibañez César Díaz Gonzales<sup>1</sup>, Jesús Angel Cerrón Inga<sup>2</sup>, Juan Néstor Alarcón Guizado<sup>2</sup>**

---

### RESUMEN

La necesidad de desarrollar y conocer métodos de tratamiento metalúrgico para beneficiar minerales auríferos refractarios o difíciles de tratar por presentar contenidos de carbón, telurios, antimonio, arsénico, carbonatos y oro en solución sólida en sulfuros, nos obliga a estudiar los diversos métodos de oxidación específica que se deben aplicar a cada mineral previo a lixiviar para alcanzar altas recuperaciones en metales preciosos.

Por gravimetría seguida de cianuración, se obtiene 94.74% de extracción de oro en el mineral estudiado.

**Palabras clave:** Selección, Procesos Minerales Complejos Oro.

### ABSTRACT

The need to develop and know methods for metallurgical treatment to process gold-bearing refractory minerals or hard to treat because of carbon contents, tellurium, antimony, arsenic, carbonates and gold in solution solid sulfides, forces us to study the different methods of specific oxidation that should be applied in each mineral before to leach ore to reach high recoveries into precious metals. Through Gravimetrically followed by cyanidation is obtained 94.74% of gold extract in the studied mineral.

**Keywords:** Complex gold selection process minerals.

---

1 Docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.  
Correo electrónico: aazanero@unmsm.edu.pe

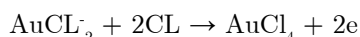
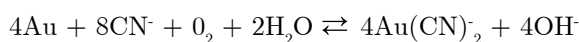
2 Alumnos de la E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

## I. INTRODUCCIÓN

Los minerales auríferos se encuentran en la naturaleza en diversas formas; en algunos casos, la recuperación de oro por métodos convencionales es limitada y pobre, debido a que algunos constituyentes que acompañan al metal precioso hacen difícil o imposible el beneficio metalúrgico.

El oro es muy estable en todo el rango de pH y no lo ataca ni un ácido o base fuerte; sin embargo, en condiciones medianamente oxidantes, la gran estabilidad del oro es reducida y puede ser disuelta o lixiviada por algunos reactivos que forman complejos auríferos; estos reactivos son: cianuro (CN<sup>-</sup>), thiourea CS(HH<sub>2</sub>)<sup>2+</sup>, tiocianato (SCN<sup>-</sup>) y thiosulfato (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>2-</sup> que prefieren iones metálicos de valencia baja; por ejemplo, Au(I); mientras que el cloro (Cl<sup>-</sup>), bromo (Br<sup>-</sup>) y yodo (I<sup>-</sup>) prefieren iones metálicos de valencia alta; por ejemplo, Au (III).

Las reacciones químicas para el caso del cianuro y cloro son:



Entre los factores que afectan la selección del proceso metalúrgico son: contenido medio o alto de carbón,

oro diseminado o en solución sólida en los sulfuros de hierro como pirita, arsenopirita y pirrotita, carbonatos, telurios, arsénico, antimonio y/o sulfuros básicos de Pb, Cu y Zn, en estos minerales ya no es posible aplicar lixiviación directa, requieren procesos de oxidación (Marsden, 1993 y 1996) que son costosos y complicados de llevar a la práctica, entre estos procesos disponibles tenemos: Preaireación, oxidación a alta presión y temperatura en medio ácido, oxidación a alta presión y temperatura en medio alcalino, clorinación, oxidación biológica, nítrica y pirometalúrgica (esta última en declive por razones de salud y medioambientales).

## II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El diseño experimental (Contreras, 1967) para el mineral en estudio se ha realizado en función de los contenidos mineralógicos y químicos de la muestra, para obtener resultados satisfactorios.

### Procesos metalúrgicos para tratar minerales auríferos complejos

En seguida, mostramos un cuadro donde observamos el oro en asociación con otros minerales y el proceso o procesos que se pueden aplicar para recuperar el metal precioso.

Tabla N.º 1. Minerales Auríferos/Procesos

| Mineral aurífero con:                    | Proceso (s)   |
|--|---|
| Sulfuros de cobre                        | SART  |
| Oro libre o nativo                       | Gravimetría – cianuración intensiva   |
| Sulfuros de Cu, Pb y Zn                  | Flot – tostación – fundición – Ref.   |
| Teluros                                  | Lixiviación HCl + Fe <sup>3+</sup>  |
| Antimonio                                | Lixiviación NaCl + HCl + Fe <sup>3+</sup> + Preaireación con Pb NO <sub>3</sub> Cianuración |
| Arsénico                                 | Oxidación biológica cianuración   |
| Carbón                                   | Oxidación con cloro cianuración   |
| Marcasita/pirrotita                      | Aireación – Cianuración / Aireación alcalina - Cianuración                                  |
| Pirita                                   | Oxidación alta temperatura (autoclaves) - Cianuración                                       |
| Sulfuros consumidores de CN <sup>-</sup> | Thiourea  |
| Refractarios carbonosos de baja ley      | Oxidación biológica Heap – Lix. Thiosulfato   |

### Objetivos

1. Estudiar un mineral aurífero y recuperar eficientemente los metales preciosos.
2. Determinar los factores principales para la selección de diagramas de flujo para beneficiar minerales complejos de oro.

### Hipótesis

El mineral requiere un diagrama de flujo de tratamiento metalúrgico complicado y combinación de métodos de tratamiento para llegar a obtener resultados satisfactorios

### Equipamiento

El laboratorio de Metalurgia Extractiva está equipado con:

- Chancadora de quijada
- Trituradora de cono
- Molino de bolas
- Celdas de flotación
- Potenciómetro digital
- Agitador de rodillos
- Balanzas electrónicas
- Ro-tap y mallas.

**Estudio mineralógico del mineral**

**Tabla N.º 2.** Minerales observados

| Minerales     | Fórmula                           | Abreviatura |
|---------------|-----------------------------------|-------------|
| Pirita        | FeS <sub>2</sub>                  | Py          |
| Manganita     | Mn <sub>3</sub> O(OH)             | Man         |
| Goetita       | Fe <sub>3</sub> O(OH)             | Gt          |
| Lepidocrocita | g - Fe <sub>3</sub> O(OH)         | Lp          |
| Calcopirita   | CuFeS <sub>2</sub>                | Cp          |
| Magnetita     | (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) | Mt          |
| Covelita      | ZnS                               | Ef          |
| Galena        | PbS                               | Gn          |
| Electrum      | (Au, Ag)                          | El          |
| Gangas        |                                   | GGs         |

**Minerales Auríferos**

Se han observado minerales auríferos tales como el electrum. Asimismo, tenemos la calcopirita, arsenopirita y pirita, que por lo común presentan oro (Au) en estado submicroscópico (Dana, 1981).

**Minerales Argentíferos**

No se han observado minerales de plata.

**Otros Minerales**

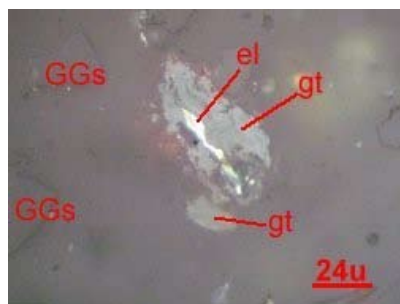
En este grupo se encuentran las gangas.

**Tabla N.º 3.** Distribución Volumétrica y Grados de Liberación

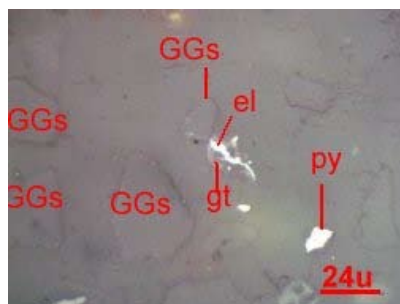
| Minerales     | Volumen | Grado de liberación % |
|---------------|---------|-----------------------|
| Pirita        | 21.39   | 99.02                 |
| Manganita     | 1.29    | 100.00                |
| Goetita       | 1.36    | 79.60                 |
| Calcopirita   | 0.59    | 68.97                 |
| Lepidocrocita | 0.54    | 100.00                |
| Magnetita     | 0.41    | 100.00                |
| Covelita      | 0.07    | 90.91                 |
| Esfalerita    | 0.01    | 0.00                  |
| Electrum      | 0.04    | 0.00                  |
| Gangas        | 74.19   | 99.52                 |



**Figura 1.** Partículas libres de pirita (py), de manganita (man), de calcopirita (cp) y de gangas (GGs). Nícoles paralelos - 200x.



**Figura 2.** Partículas libres de gangas (GGs), y una partícula entrelazada de electrum (el) con goetita (gt) - Nícoles Paralelos – 500x.



**Figura 3.** Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs). También una partícula entrelazada de electrum (el) con goetita (gt) - Nícoles Paralelos – 500x.

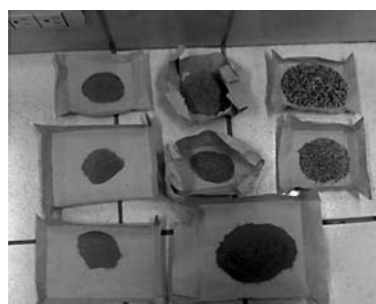
**Tabla N.º4:** Análisis Químico del Mineral de Cabeza

| ANÁLISIS QUÍMICO DEL MINERAL DE CABEZA |     |      |         |      |       |     |     |
|--|-----|------|---------|------|-------|-----|-----|
| Leyes                                  | %   |      | Ag y Au |      | Gr/TM |     |     |
|  | Ag  | Cu   | Au      | Fe   | S     | pH  | % H |
|  | 3.9 | 0.09 | 24.7    | 7.49 | 3.21  | 5.5 | 2.1 |

**III. PRUEBAS EXPERIMENTALES**

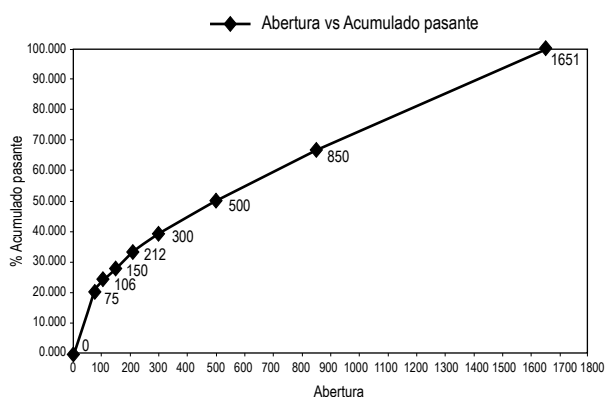
**Análisis Granulométrico**

**Tabla N.º 5.** Resultados De Análisis Granulométrico



| Intervalo de tamaño | Malla Tyler | Abertura | Peso retenido gr. | Retenido parcial % | Retenido acumulado % | Pasante acumulado % |
|---------------------|-------------|----------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
|                     | i           | m (di)   | Mi                | fi                 | Ri                   | Fi                  |
| 0                   | 6           | 3327     | 0.00              | 0.000              | 0.000                | 100.000             |
| 1                   | 8           | 2362     | 0.00              | 0.000              | 0.000                | 100.000             |
| 2                   | 10          | 1651     | 0.00              | 0.000              | 0.000                | 100.000             |
| 3                   | 20          | 850      | 98.80             | 33.244             | 33.244               | 66.756              |
| 4                   | 35          | 500      | 48.6              | 16.353             | 49.596               | 50.404              |
| 5                   | 50          | 300      | 32.3              | 10.868             | 60.464               | 39.536              |
| 6                   | 70          | 212      | 17.5              | 5.888              | 66.353               | 33.647              |
| 7                   | 100         | 150      | 16                | 5.384              | 71.736               | 28.264              |
| 8                   | 140         | 106      | 12                | 4.038              | 75.774               | 24.226              |
| 9                   | 200         | 75       | 11.3              | 3.802              | 79.576               | 20.424              |
| 10                  | -200        | -75      | 60.7              | 20.424             | 100.000              | 0.000               |
| <b>Total</b>        |             |          | 297.2             | 100.000            |                      |                     |

Tabla N.º 6. Resultados de análisis granulométrico



| Abertura | Pasante Acumulado % |
|----------|---------------------|
| µm (di)  | Fi                  |
| 3327     | 100.000             |
| 2362     | 100.000             |
| 1651     | 100.000             |
| 850      | 66.756              |
| 500      | 50.404              |
| 300      | 39.536              |
| 212      | 33.647              |
| 150      | 28.264              |
| 106      | 24.226              |
| 75       | 20.424              |
| 0        | 0.000               |

**Concentración Gravimétrica**

Mineral : 200 gr  
 Granulometría : 80% - 200 m  
 Gravedades : 60  
 Presión agua : 3 psi  
 Equipo : Concentrador Falcón

Tabla N.º 6. Resultados de concentración gravimétrica en concentrador Falcon

| Producto | Peso % | Ley: gr/TM Au | % Distribución Au |
|----------|--------|---------------|-------------------|
| Conc. Au | 10     | 180.4         | 73.04             |
| Relave   | 90     | 7.4           | 26.96             |
| Cabeza   | 100    | 24.7          | 100               |



**Cianuración Directa**

Condiciones del trabajo

Mineral : 250 gr.  
 Agua : 750 cc.  
 pH : 11.5 -10.5  
 NaCN : 0.10 %  
 Tiempo : 24 hrs.  
 Variable : Granulometría  
 Prueba 1 : 100% - 75 µm  
 Prueba 2 : 100% -100 µm



Tabla N.º 7. Resultados de Cianuración Directa

| PRUEBA N.º 1 : 100% - 75 µ |           |               |                   |                         |       |
|----------------------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------------|-------|
| Producto                   | Vol. Peso | Ley: gr/TM Au | Recuperación % Au | Consumo reactivos Kg/TM |       |
| Sol. Rica                  | 750 ml    | 7.436 mg/l    | 90.32             | NaCH                    | Cal   |
| Res. Cian.                 | 2490 gr   | 2.4           | 9.68              | 3.14                    | 1.200 |
| Cab. Calc.                 | 250 gr    | 24.7          | 100.00            |                         |       |

Tabla N.º 8. Resultados de Cianuración Directa

| PRUEBA N.º 2 : 100 % - 100 µ |           |               |                    |                         |       |
|------------------------------|-----------|---------------|--------------------|-------------------------|-------|
| Producto                     | Vol. Peso | Ley: gr/TM Au | Recuperación n% Au | Consumo reactivos Kg/TM |       |
| Sol. Rica                    | 750 ml    | 7.336 mg/l    | 89.09              | NaCH                    | Cal   |
| Res. Cian.                   | 249.5 gr  | 2.7           | 10.91              | 3.160                   | 0.900 |
| Cab. Calc.                   | 250.0 gr  | 24.7          | 100.00             |                         |       |

**Amalgamación**

|                        |                |   |             |
|------------------------|----------------|---|-------------|
| Condiciones de trabajo |                | Mercurio Metálico   | 10.000      |
| Molienda               |                | Tiempo  | 15 minutos  |
| Mineral                | 1000 gr – 10 m | Granulometría   | 61% - 200 m |
| Agua                   | 500 cc         | pH  | 9.5         |
| Reactivos              | Kg/TMS         | Separación de Amalgama (Au <sup>0</sup> + Ag <sup>0</sup> ) / ganga |             |
| NaOH                   | 1.000          | Equipo concentrador gravimétrico de oro                             |             |

Tabla N.º 9. Resultados de Amalgamación

| Producto                               | Peso Gr  | Ley:gr/TM Au | Recuperación % Au |
|--|----------|--------------|-------------------|
| Au (amalgama)                          | 17.89 mg | 920 ppm      | 67.98             |
| Residuo Amalgamación                   | 980.0    | 7.91         | 32.02             |
| Cab. Calc.                             | 980.0    | 24.7         | 100.00            |
| Cianuración del Relave de Amalgamación |          |              |                   |

|                        |   |        |               |           |             |
|------------------------|---|--------|---------------|-----------|-------------|
| Condiciones de trabajo |   | pH     | :             | 11 - 10.2 |             |
| Muestra                | : | 250 gr | Tiempo        | :         | 24 horas    |
| Dilución               | : | 311    | Granulometría | :         | 61% - 200 m |

Tabla N.º 10. Resultados de Cianuración del Relave de Amalgamación

| Producto   | Vol. Peso | Ley: gr/TM Au | Recuperación % Au | Consumo reactivos Kg/TM |       |
|------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------------|-------|
| Sol. Rica  | 750 ml    | 2.1918 mg/l   | 83.57             | NaCN                    | Cal   |
| Res. Cian. | 248.7 gr  | 1.30          | 16.43             | 1.850                   | 0.680 |
| Cab. Calc. | 248.7 gr  | 7.91          | 100.00            |                         |       |

Tabla N.º 11: Resultado Global de Recuperación de Oro. Amalgamación - Cianuración

| Producto      | Peso Vol. | Ley: gr/TM Au | Recuperación % Au |
|---------------|-----------|---------------|-------------------|
| Au (amalgama) | 17.89 mg. | 920 ppm       | 67.98             |
| Sol. Rica     | 750 ml    | 2.1918 mg/l   | 26.76             |
| Res. Cian.    | 248.7 gr. | 1.30          | 5.26              |
| Cab. Calc.    | 248.7 gr. | 24.70         | 100.00            |

|                                    |                  |                      |              |
|------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|
| <b>Flotación de Oro</b>            |                  | Granulometría        | 61 % - 200 m |
| Condiciones de trabajo             |                  | Acondicionamiento Au |              |
| Molienda                           |                  | XZ - 14              | 0.050        |
| Mineral                            | : 1000 gr – 10 m | Aceite de Pino       | 0.010        |
| Agua                               | : 500 cc.        | Tiempo               | 5 minutos    |
| Reactivos                          | Kg/TMS           | Flotación de oro     |              |
| NaOH                               | 0.500            | Tiempo               | 6 minutos    |
| CuSO <sub>4</sub> <sup>(3,6)</sup> | 0.100            | Limpieza de oro      |              |
| Aerofloat 208                      | 0.010            | pH                   | 7.2          |
| Tiempo                             | 15 minutos       | Tiempo               | 2 minutos    |
| pH                                 | 6.9              |                      |              |

**Tabla N.º 12. Resultados de Flotación del Oro**

| Producto   | Vol. Peso | Ley: gr/TM Au | Recuperación % Au | R.C.  |
|------------|-----------|---------------|-------------------|-------|
| Conc. Au   | 4.52      | 390.2         | 71.41             | 22.12 |
| Medios Au  | 9.05      | 21.7          | 7.95              |       |
| Relave     | 86.43     | 5.9           | 20.64             |       |
| Cab. Calc. | 100.00    | 24.7          | 100.00            |       |

**Cianuración del Relave de Flotación**

|                        |                  |        |            |
|------------------------|------------------|--------|------------|
| Condiciones de trabajo |                  | pH     | : 11 – 10  |
| Muestra :              | 250 gr de relave | NaCN   | : 0.10 %   |
| Agua :                 | 750 cc           | Tiempo | : 24 horas |

**Tabla N.º 13. Resultados de Cianuración del Relave de Flotación**

| Producto   | Vol. Peso | Ley: gr/TM Au | Recuperación % Au | Consumo reactivos Kg/TM |
|------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Sol. Rica  | 750 ml    | 1.565 mg/l    | 79.66             | NaCN      Cal           |
| Res. Cian. | 249.8 gr  | 1.2           | 20.34             | 1.630      0.920        |
| Cab. Calc. | 249.8 gr  | 5.9           | 100.00            |                         |

**Tabla N.º 14. Resultado Global de Recuperación de Oro Flotación - Cianuración**

| Producto   | Vol. Peso | Ley: gr/TM Au | Recuperación % Au |
|------------|-----------|---------------|-------------------|
| Conc. Au   | 4.52      | 390.2         | 71.41             |
| Medios Au  | 9.05      | 21.7          | 7.95              |
| Sol. Rica  | 750 cc    | 1.565 mg/l    | 16.44             |
| Res. Cian. | 249.8 gr  | 1.2           | 4.20              |
| Cab. Calc  | 249.8 gr  | 24.7          | 100.00            |

**IV. RESULTADOS**

|                      |  |                       |        |
|----------------------|--|-----------------------|--------|
| Análisis/Procesos    | Resultados/Recuperación Au                 | Gravimetría (falcon)  | 73.04% |
| Minerográfico        | Electrum                                   | Amalgamación          | 67.98% |
| (Microscopía óptica) | (Au <sup>+</sup> -Ag <sup>0</sup> ) Cp, Py | Amalg./cianuración    | 94.74% |
| Químico              | Au 24.7 gr/TM                              | Flotación             | 71.41% |
| Granulométrico       | 1170 u 80% passing                         | Flotación/cianuración | 87.85% |

## V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- El oro se encuentra en los minerales en diversas formas, desde muy dóciles para el tratamiento por gravimetría, flotación o lixiviación hasta complejos y muy difíciles de beneficiar; por ejemplo, cuando el oro está en solución sólida en los sulfuros, requiere oxidación previa a cianuración convencional.
- Los métodos de oxidación son muy caros y requieren equipos especiales, los minerales o concentrados deben tener alta ley para poder compensar el alto costo de tratamiento.
- El alto precio del oro puede justificar un proceso de oxidación y motivar el aprovechamiento de minerales auríferos refractarios.
- Para lixiviar el oro se requiere además del reactivo acompanyante un oxidante como es el  $O_2$  para el caso de la cianuración.
- El mineral investigado tiene oro libre, electrum; el estudio mineralográfico y los resultados de amalgamación lo confirman.
- Concentración gravimétrica en Falcón, amalgamación, cianuración y flotación solos son insuficientes para alcanzar buena extracción; se requiere combinar dos procesos, gravimetría y cianuración, para obtener alta recuperación de oro en este mineral.

## VI. CONCLUSIONES

- Los factores principales para la selección de diagramas de flujo en minerales complejos auríferos son: Oro en solución sólida en los sulfuros de hierro, oro en sulfuros básicos, telurios, arsénico, antimonio, carbonatos y carbón orgánico.
- El mineral investigado tiene buena ley de oro: 24.7 gr/TM, o 0.794 Oz/TC representa un valor económico de US\$ 850.00 por TMM.
- Hay oro libre en forma de electrum; 68% del total, el otro 32% debe estar asociado con la calcopirita y pirita.

- Por gravimetría y amalgamación, se recupera 73.04 y 67.98% del oro, respectivamente.
- Flotar y cianurar el relave de flotación se recupera 87.85% Au.
- Amalgamar y cianurar el relave de amalgamación da una extracción total de 94.74% del oro total.
- De acuerdo a los resultados obtenidos el mineral se procesará por gravimetría para captar el oro libre y electrum, este concentrado será tratado por cianuración intensiva o fusión directa, para evitar la contaminación del mercurio, seguida de cianuración convencional del relave gravimétrico

## VII. AGRADECIMIENTO

Al Consejo Superior de Investigaciones, al Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Geográfica; a la Dirección y Coordinación de la EAP de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM, por las facilidades prestadas a través de los Laboratorios de Metalurgia Extractiva, así como a profesores y estudiantes que colaboraron con el desarrollo del Proyecto de Investigación N.º 091601021.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dana Edward S., Ford William E. "Tratado de Mineralogía". 8va ed., 1981, México: Editorial Continental México S.A., 496 - 506.
2. Contreras Castro, David. "Experimentación de Minerales de Oro y Plata por el Proceso de Cianuración". 2da ed., Mz 1967; 1 - 27.
3. Marsden John O. "The chemistry of gold extraction", 1º ed., Ellis Norwood Limited, Great Britain, 1993, Cap. V, pp. 177 - 257.
4. Marsden John O. "The chemistry of gold extraction". 2da. Ed., Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Colorado - USA 1996.
5. Quadrio A.J. y K. R. Kellett. "Recovery of gold from Lancefield arsenical sulphide ore". Regional Conference on "Gold Mining Metallurgy and Geology". Oct. 1984.