

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN DEL COBRE OBTENIDO A PARTIR DE UN MINERAL SULFURADO DEL COMPLEJO MARAÑÓN, PERÚ

**D. Lovera**<sup>(1)</sup>, **C. V. Landauro**<sup>(2)</sup>, **A. Bustamante**<sup>(2)</sup>, **V. Arias**<sup>(1)</sup>, **J. Quiñones**<sup>(1)</sup>, **M. Pillaca**<sup>(2)</sup>, **R. Soto**<sup>(1)</sup>, **L. Puente**<sup>(1)</sup>, **J. Medina**<sup>(2)</sup>, **R. Coronado**<sup>(1)</sup>, **A. Solís**<sup>(1)</sup>, **R. Valencia**<sup>(1)</sup>, **P. Gagliuffi**<sup>(1)</sup>, **J. Diego**<sup>(1)</sup>

(1) Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, PERÚ.

(2) Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, PERÚ.

E-mail (Daniel Lovera): [dloverad@unmsm.edu.pe](mailto:dloverad@unmsm.edu.pe)

### RESUMEN

*La región geológica conocida como Complejo Marañón tiene minerales metálicos como cobre, zinc, plata u oro en forma de rocas antiguas, lo cual muestra un escenario favorable para la explotación minera sostenible. En ese sentido, el estudio del proceso de cementación del cobre a partir del mineral sulfurado es indispensable para determinar los procedimientos más viables tanto técnica como económicamente.*

*En este trabajo presentamos un estudio experimental del proceso de cementación del cobre obtenido de una muestra mineral sulfurada de cobre-zinc del Complejo Marañón, Perú. Para obtener dicho cemento se ha sometido la muestra inicial a una serie de procesos metalúrgicos como chancado, molienda, tostación, lixiviación, extracción por solventes y cementación. El monitoreo de los cambios estructurales y microestructurales del mineral se llevó a cabo empleando difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectroscopia Mössbauer, microscopio óptico mineralográfico y absorción atómica.*

*Los resultados preliminares del análisis combinado de estas técnicas muestran que el mineral inicial tiene presencia de calcopirita, esfalerita y cronstedtita entre otros. Luego del proceso de tostación se forman hematita, marcasita y Sulfuro de Fe-Zn. Mientras que después del proceso de lixiviación se tiene óxido de silicio, sulfuro de Fe-Zn, hematita y calcopirita. Finalmente, el proceso de extracción por solventes y después de purificar la solución se obtiene un cemento de Cobre y trazas de la aleación Cu-Fe. Además, el estudio por espectroscopia Mössbauer confirma la presencia de hematita y marcasita durante los procesos de tostación y lixiviación de la muestra. Vale la pena mencionar que como producto final se puede obtener alternativamente Sulfato de Cobre.*

*Las pruebas metalúrgicas llevadas a cabo en el laboratorio indican que se tiene un buen procedimiento metalúrgico para obtener cobre a partir de la calcopirita, lo cual significa una buena posibilidad económica para la región del complejo Marañón; además del evidente interés industrial que puede llevar este procedimiento.*

**Tópico:** Tópico 1: Metalurgia Extractiva

**Palabras Clave:** Metalurgia Extractiva, Cementación, Espectroscopia Mössbauer, Procesos Metalúrgicos, Complejo marañón

## I.-INTRODUCCION

Según las fuentes estadística del Ministerio de Energía y Minas (MEM) las regiones que producen más cobre en el Perú son las siguientes: Ancash, Arequipa, Moquegua, Tacna, Cuzco, Pasco, la sierra de Lima, Junín, lugares donde justamente hay varios yacimientos mineros y en otras regiones están en la fase exploratoria como el caso de la región Huánuco, pero en una visión prospectiva se avizora que el Perú cuenta con grandes reservas de minerales de cobre.

Mostrando el Perú un liderazgo en la producción de minerales metálicos como el caso del oro, plata, cobre y zinc; es preciso desarrollar intensivas investigaciones metalúrgicas para dar mayor valor tecnológico a los recursos mineros mencionados. Se estudia un mineral de calcopirita sulfurada de la zona del Complejo Marañón de intensa actividad prospectiva por oro y polimetálicos.

La lixiviación ácida de muestras del mineral tostado a baja temperatura provee soluciones conteniendo cobre disuelto que son enriquecidas y purificadas por extracción por solventes para luego recuperarse cobre por cementación con chatarra ligera de hierro. Se muestra el proceso como tecnología importante para las empresas productoras en su estrategia competitiva a corto y largo plazo.

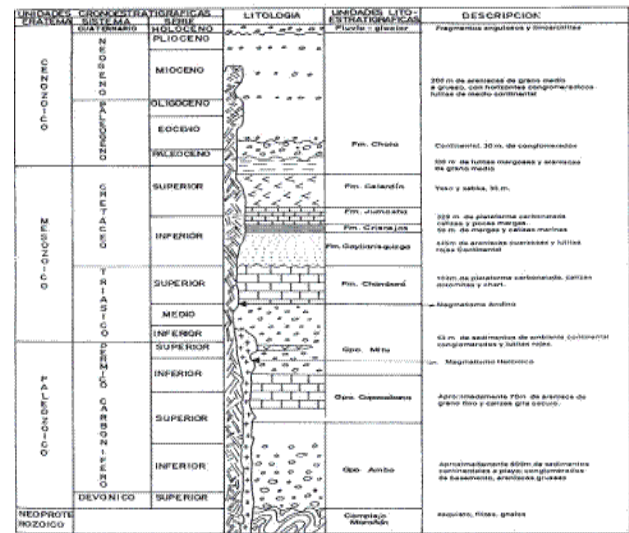
## II.- Geología del Complejo Marañón

El Complejo del Marañón consiste en una potente secuencia de rocas metamórficas que afloran ampliamente en la parte central y en la región oriental del Perú. En general, los afloramientos se encuentran en ambas márgenes del río Marañón, y consisten de esquistos micáceos, cloritosos de coloración gris y verde, los cuales están cortados por vetas de cuarzo lechoso de diferente grosor.

El resto del Complejo del Marañón consiste generalmente en filitas y pizarras de color gris; presentando, además, una unidad meta volcánica que se presenta a manera de grandes lentes que se siguen a través de cientos de metros (Figura 1 y 2).

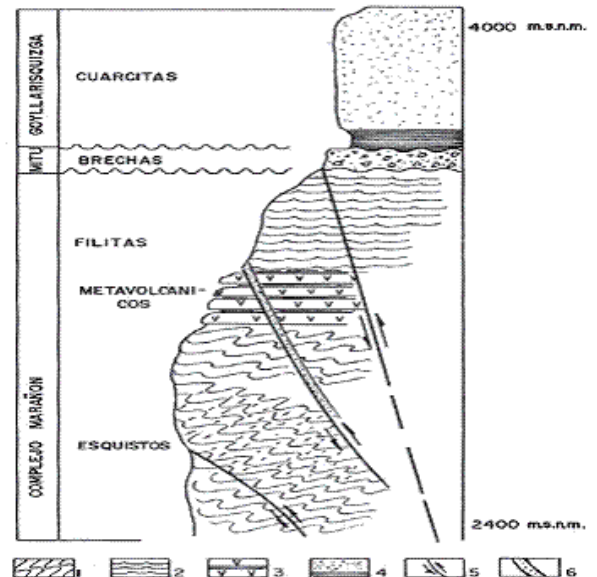
La zona de estudio está enmarcada en una región que es materia de una intensa actividad prospectiva por oro y polimetálicos (Pb, Zn, Cu, Ag, Mn, Co), caso de los cuadrángulos de Patatz, Tayabamba, Pomabamba, Huari, La Unión, Huánuco; bajo esta perspectiva es obvia la importancia económica del

área por encontrarse dentro del alineamiento tectónico regional.



**Figura 1** Columna estratigráfica del cuadrángulo de singa.

**Fuente:** Jacay et al. (1996).



**Figura 2** Columna esquemática de la parte Oeste del Valle de río Marañón, Área Huacchis-Arancay. (1) Esquistos; (2) Filitas; (3) Metavolcánicos; (4) Fm. Goyllarisquizga; (5) Fallas y (6) Vetas de cuarzo.

**Fuente:** Jacay et al. (1990).

La tecnología de la extracción por solvente para la recuperación del cobre y principalmente sus procesos extractivos. La extracción por solvente con

una trayectoria en el cobre de más de 20 años, ha mostrado ser un elemento tecnológico importante para las empresas productoras en su estrategia competitiva a corto y largo plazo. En la industria del cobre, se aplicó industrialmente a fines de la década del 60, hoy en día, las plantas con SX están permitiendo recuperar mas cobre provenientes de diferentes soluciones. La estrategia de aplicación original aún se mantiene en numerosas plantas que lixivian minerales de baja ley. Sin embargo los desarrollos y avances en SX, han ampliado su potencialidad y así como actualmente se procesan soluciones de mayor contenido en cobre y ácido e incluso para soluciones amoniacaes. Se cuenta las posibles rutas hidrometalurgicas que podrían ser favorables para los minerales nacionales de Cobre::

**Ruta I:** Mineral >> Molienda >> Lixiviación >> Extracción por Solventes >> Electrowining >> Cátodos de Cobre

**Ruta II:** Mineral >> Molienda >> Tostación >> Lixiviación >> Extracción por Solventes >> Electrowining >> Cátodos de Cobre

**Ruta III:** Mineral >>Molienda >> Lixiviación >> Extracción por Solventes >> Cementación >> Cementos de Cobre

La pequeña minería podría incursionar con la Ruta III para potenciar su inversión y desarrollo minero-metalúrgico.

### III.-EXPERIMENTACION

#### 3.1 Caracterización de Mineral Sulfurado

Se trabajo con un mineral de calcopirita sulfurada del Complejo Marañón. El análisis químico del mineral se muestra a continuación en la Tabla I:

**Tabla N° I:** Análisis Químico del Mineral de Cabeza

% Cu	Ag ( oz/TM)	Au ( oz/TM)
4,27	1316	0,19

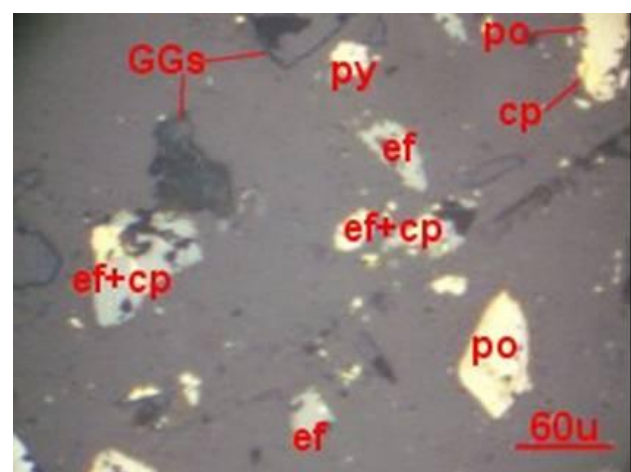
La muestra de producto metalúrgico se ha analizado mediante el método de la microscopía óptica de luz reflejada, para lo cual previamente se preparo una briqueta pulida, sobre la cual se hizo en primer término las caracterización mineralógica, sobre la base de ésta a continuación se procedió a hacer el análisis modal, cuyo resultado se da a continuación.

La calcopirita ocupa el 33.66 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 32.97% se halla libre, quedando aún entrelazada el 0.69 % restante, siendo el motivo de su no liberación total el tipo geométrico de entrelazamiento en el cual está inmerso, tal como se aprecia en la Tabla N° II

**Tabla N° II:** Minerales presentes y su grado de liberación

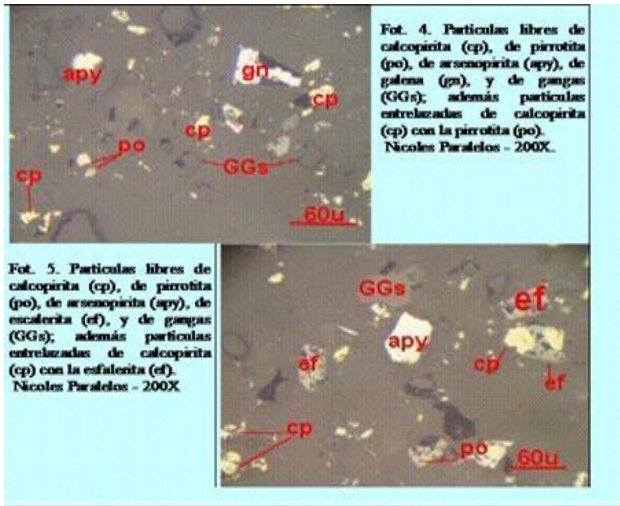
MINERALES	VOLUMEN PORCENTUAL	GRADO DE LIBERACIÓN PORCENTUAL
Calcopirita	33.66	97.94
Pirrotita	31.00	99.98
Esfalerita	4.43	80.93
Arsenopirita	0.65	93.46
Goetita	1.21	100.00
Pirita	1.28	71.09
Covelita	0.12	52.63
Galena	0.36	100.00
Gangas	27.29	99.67

Los minerales encontrados son: Calcopirita, Limonita, Covelita, Pirita, Galena Escalerita, Arsenopirita, Goetita, Gangas. (Quiñones,2009), Ver figuras 3,4 y 5.

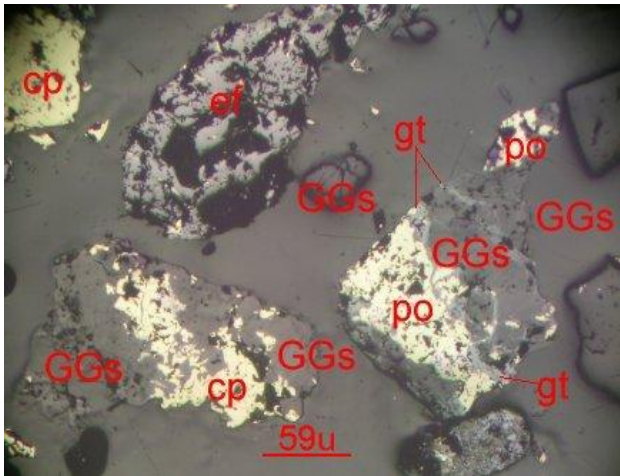


**Figura 3.** Microfotografías de minerales de calcopirita (cp), de pirrotita(po), de esfalerita (ef), de pirita (py) y de gangas(GGs); además partículas entrelazadas de calcopirita (cp) con la esfalerita (ef)

y calcopirita (cp) con la pirrotita (po). Nicoles Paralelos - 200X.



**Figura 4.** Microfotografías de minerales en Nicoles Paralelos – 200X



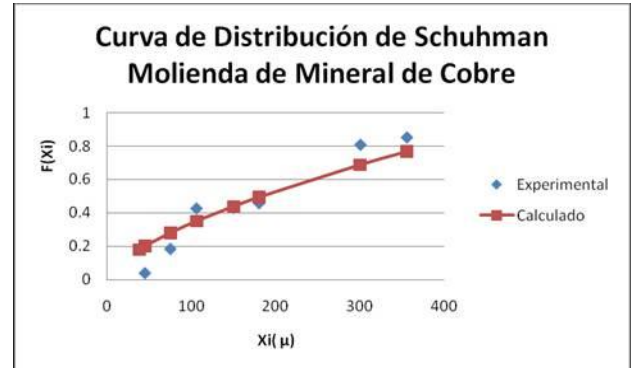
**Figura 5.** Partículas libres de esfalerita(ef), de calcopirita(cp), de pirrotita(po) y de gangas(GGS). y también están las partículas entrelazadas de la calcopirita(cp) con las Gangas(GGS), pirrotita(po) con Gangas (GGs) y gometita(gt).Magnificación: 200X

### 3.2 Procedimiento Experimental

#### 3.2.1 Chancado y Molienda

La cinética de molienda de los minerales se llevó a cabo en el Laboratorio de Extractiva de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica empleando los siguientes equipos y materiales: Chancadora ( BH41- DECO),

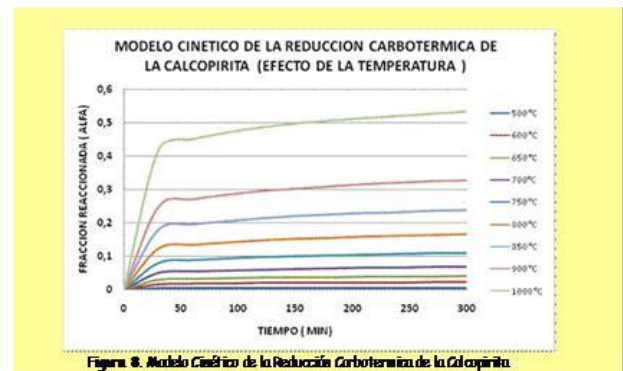
Molino (7117 A – DECO), Rotap ( WS TYLER 8570) y Tamices (Tyler Standard), la figura 6 muestra alguno de los resultados obtenidos.



**Figura 6.** Curva de Distribución de Schuhman

#### 3.2.2 Tostación

Los experimentos fueron corridos en un horno mufla del Laboratorio de Pirometalúrgia de la Escuela de Ingeniería Metalurgia. Las mezclas fueron preparadas previo pesada en balanza de precisión, luego fueron colocadas en una copela las cuales fueron introducidas en la mufla para sacarlas bajo condiciones de tiempo, temperatura, razón molar de mezclado. Al sacarlas de la mufla se las enfriaba, para su posterior estudio de pérdida de peso, análisis químico, de difracción de rayos X Ver figura 7.

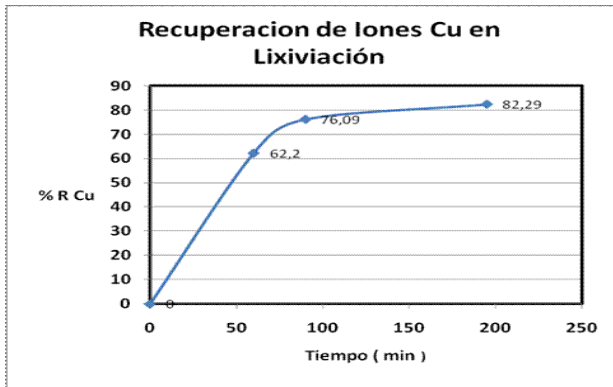


**Figura 7.** Curvas Cinéticas de la Reducción carbotermica de la Calcopirita

#### 3.2.3 Lixiviación

En laboratorio se probó la cementación de cobre con chatarra ligera de hierro. La solución

conteniendo cobre disuelto proviene de la lixiviación ácida de la muestra mineral sulfurado de cobre proveniente del Marañón. Para obtener mejores resultados previamente las muestras fueron tostadas a baja temperatura (400 C) por doce horas y luego se procedió con una lixiviación por agitación de 4 horas (Figura 8).



**Figura 8.** Curva de Recuperación de Cobre (+2) en la Lixiviación del Mineral Sulfurado

### 3.2.4 Extracción por Solventes

La solución lixiviada se purificó mediante Extracción por solventes (Figura 6) para después agregar chatarra ligera de hierro en forma de partículas laminares con amplio exceso del necesario teórico. La agitación fue constante y para la cinética del proceso se procedió a retirar muestras de la solución cada cierto tiempo como se muestra en la figura 9.



**Figura 9.** Solución Extractada de Sulfato de Cobre (PLS)

### 3.2.5 Cementación

En laboratorio se probó la cementación de cobre con chatarra ligera de hierro. La solución

conteniendo cobre disuelto proviene de la lixiviación ácida de la muestra mineral sulfurado de cobre proveniente del Marañón. Para obtener mejores resultados previamente las muestras fueron tostadas a baja temperatura (400 °C) por doce horas. La concentración inicial de solución a cementar es de 3.33 g Cobre por litro. La chatarra ligera de hierro se agregó en forma de partículas laminares con amplio exceso del necesario teórico. Ver figura 10.



**Figura 10.** Pruebas Experimentales de Cementación cobre

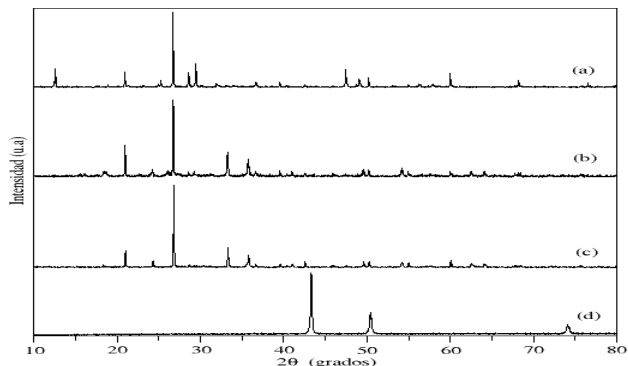
### 3.3 Caracterización de los Productos Obtenidos

El monitoreo de los productos obtenidos empleando técnicas combinadas de caracterización tales como difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), espectroscopia Mössbauer (EM) nos permite tener una mejor información de las especies participantes y además nos ayuda a controlar y optimizar mejor los procesos metalúrgicos.

Para la DRX se empleó un Difractómetro de rayos X marca Bruker modelo D8-Focus con radiación Cu-  $K\alpha$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ), para la EM se empleó una fuente radioactiva de  $^{57}\text{Co}/\text{Rh}$  de 25mCi y para los análisis de FRX se empleó un equipo portátil de FRX con cátodo de Ag, voltaje de 20 kV y corriente hasta de 100  $\mu\text{A}$ .

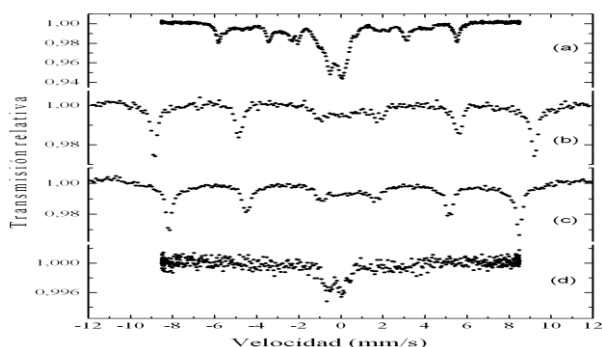
El proceso de cementación de cobre a partir del mineral de cabeza, tostación y lixiviación se ha monitoreado por DRX y EM, como se muestra en las Figs. 11 y 12, respectivamente. Para determinar las fases cristalinas presentes se realizó previamente un análisis elemental por FRX (no mostrado aquí) la cual mostró la presencia de Si, S, Fe, Cu, Zn en el mineral de cabeza y de Cu (con restos de Fe) en el cemento final de cobre, como es

esperado. Los resultados del análisis combinado de estas técnicas muestran que el mineral inicial tiene presencia de calcopirita, esfalerita y cronstedtita entre otros. Luego del proceso de tostación se forman hematita, marcasita y sulfuro de Fe-Zn. Mientras que después del proceso de lixiviación se tiene óxido de silicio, sulfuro de Fe-Zn, hematita y calcopirita



**Figura 11:** Patrones de Difracción de rayos X del (a) mineral de cabeza, (b) tostación, (c) lixiviación y (d) cemento de cobre. Los espectros han sido corridos hacia arriba para una mejor comparación.

Finalmente, el proceso de extracción por solventes y después de purificar la solución se obtiene un cemento de Cobre y trazas de la aleación Cu-Fe. Además, el estudio por espectroscopia Mössbauer confirma la presencia de hematita y marcasita durante los procesos de tostación y lixiviación de la muestra. Vale la pena mencionar que como producto final se puede obtener alternativamente Sulfato de Cobre.

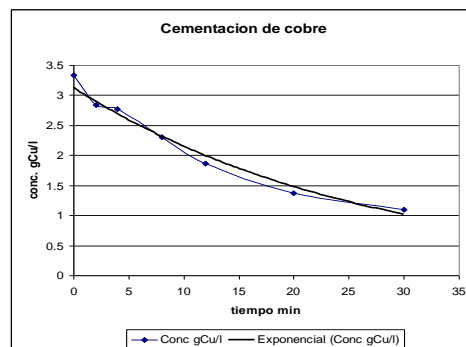


**Figura 12:** Espectros Mössbauer del (a) mineral de cabeza, (b) tostación, (c) lixiviación y (d) cemento de cobre. Los espectros han sido corridos hacia arriba para una mejor comparación.

## IV.- DISCUSION DE RESULTADOS

### 4.1 Resultados de Cementación del Cobre

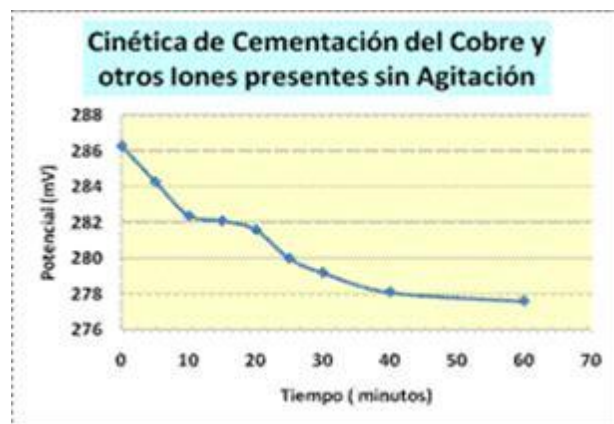
Pruebas desarrolladas con la tecnología LIX – Resinas – Cementación en el Laboratorio de Físicoquímica nos permiten encontrar el patrón de comportamiento del proceso de Cementación del Cobre. (Figura 13)



**Figura 13:** Data Experimental del proceso de Cementación de Cobre

### 4.2 Efecto de Otros Iones Presentes

Las pruebas experimentales de cementación de soluciones iónicas de cobre y otros iones presentes de ( $Ag^{+1}$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ) nos muestran los patrones de la cementación del Cobre sin agitación de la solución. (Figura 14)

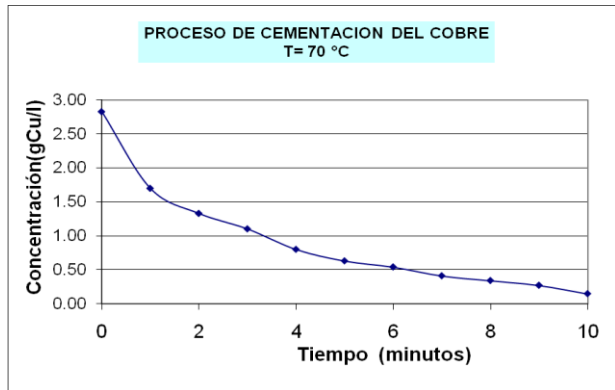


**Figura 14:** Cinética de Cementación de Cobre y otros iones presentes sin Agitación

### 4.3 Efecto de la Purificación de las Soluciones PLS

A partir de soluciones PLS obtenidas de procesos de Tostación, lixiviación y Extracción con Solventes se

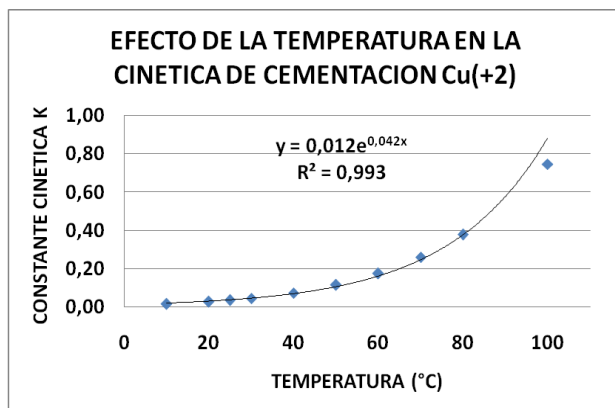
han reaccionado con partículas de Hierro obteniéndose cementos de cobre de alta calidad los cuales nos han permitido encontrar mejores tendencias de Cementación. Ver figura 15.



**Figura 15:** Proceso de Cementación del Cobre a la Temperatura de 70°C

#### 4.4 Contribución de la Temperatura en la Cinética de Cementación del Cobre

Pruebas desarrolladas nos permiten tener una base de datos de concentración – tiempo para diversas temperaturas de trabajo, los cuales nos permiten encontrar el efecto de la constante cinética de cementación con la temperatura como podemos apreciar en la figura 16, que es creciente mientras aumenta la temperatura concordando con otras investigaciones desarrolladas sobre el efecto de la temperatura.

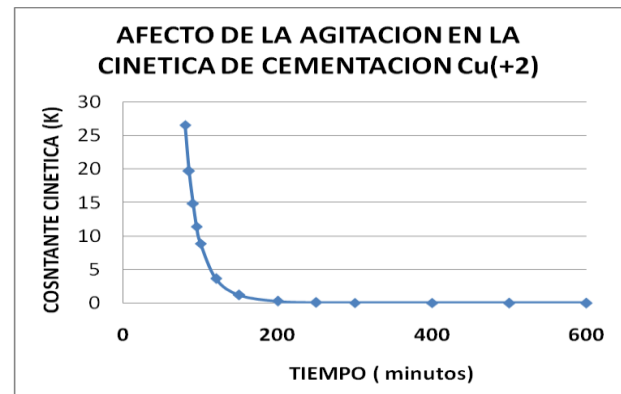


**Figura 16:** Efecto de la Temperatura en el Proceso de Cementación del Cobre

#### 4.5 Contribución de la Agitación en la Cinética

Pruebas desarrolladas para diversas condiciones de agitación de la solución al ocurrir la cementación con hierro nos permiten inferir que a mayores RPM

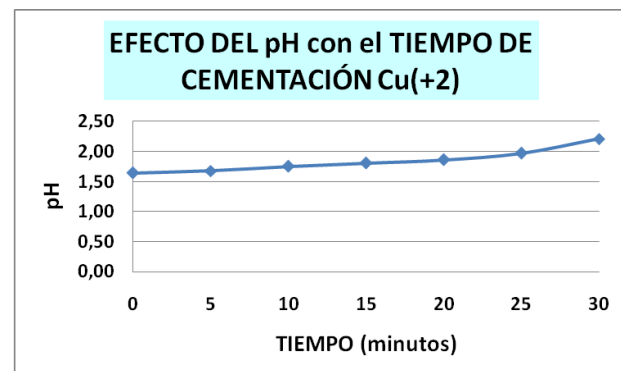
la constante cinética de cementación decrece obteniéndose bajas recuperaciones de cemento de cobre. Ver Figura 17



**Figura 17:** Efecto de la Agitación en el Proceso de Cementación del Cobre

#### 4.6 Contribución del pH en la Cinética

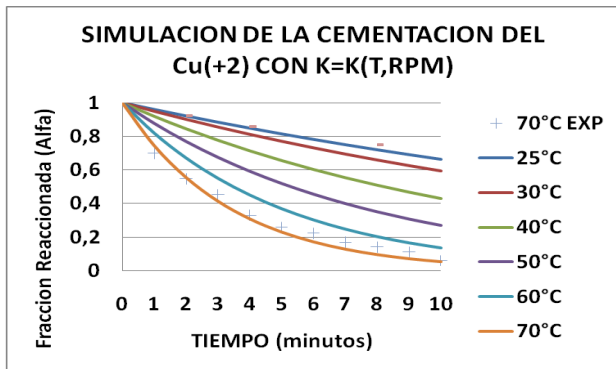
En el curso de la cementación de soluciones ricas de Cobre se puede apreciar que el pH va incrementándose hasta finalizar el proceso de cementación, es preciso acotar que a pH bajos alrededor de 0.5 en el curso de la cementación se puede apreciar la liberación de gas Hidrógeno y un alto consumo de hierro. Ver Figura 18



**Figura 18:** Efecto del pH en la Cementación del Cobre

En la figura 19 podemos apreciar la simulación de los datos experimentales con el modelo encontrado que tiene la siguiente configuración:

$$\alpha = \text{Exp}(1.7877 \cdot 10^{+19} \cdot (\text{RPM})^{-4.92} \cdot (\text{Exp}(-4493/T))^*t).$$



**Figura 19:** Simulación del Proceso de Cementación del Cobre

## V.- CONCLUSIONES

\* Se obtienen soluciones lixiviadas (PLS) de alta concentración en Cu (+2) de acuerdo al número de re-extracciones efectuadas.

\* La Caracterización empleando técnicas combinadas de difracción de rayos X (DRX), espectroscopia Mössbauer (EM) nos ayudan a controlar y optimizar mejor los procesos metalúrgicos.

\* Los cementos encontrados están por encima de 90% Cobre con lo cual aumenta su valor comercial.

## VI.-AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica, al Vicerrectorado de Investigación ,al Consejo Superior de Investigaciones CSI, al Instituto de Investigación IIGEO y al Instituto de Investigaciones de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el apoyo brindado al Proyecto de Investigación IIGEO - CSI - VRI N° 091601011. De modo especial a la Minera Chavinita por la donación de minerales sulfurados y al apoyo técnico brindado.

## VII.-REFERENCIAS

1.-Lovera.D, Bustamante. A, Quiñones.J, Puente.L 2005. **CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y PRUEBAS METALÚRGICAS EN LA PROSPECCIÓN DE MINERALES POLIMETÁLICOS EN EL COMPLEJO MARAÑÓN – PERÚ.** Revista del Instituto de Investigación FIGMMG. Vol. 8, N.º 16: 44-50

2.-Puente.L 2002. **PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y ADSORCIÓN EN EL TRATAMIENTO DE**

**EFLUENTES CONTENIENDO METALES DISUELTOS.** Vol. 5 N° 09

3.-Perez.J.C.,2008.**ANÁLISIS**

**TERMODINÁMICO DE ESPECIES CIANURADAS DE ORO, PLATA Y COBRE SOMETIDAS A CEMENTACIÓN CON ZINC Y ALUMINIO.** Scientia et Technica Vol XIV,N°38

4.-Quiñones,J, **Informe Microscopia Óptica del mineral sulfurado del Marañón, 2009, 2010**

5.-Calvo 1983. **Cementación de las Soluciones del Ion Tetra brommercuriato.** Anales de Química. Vol 83,pg 390 – 393

6.-Landauro,C, **Informe de Caracterización de Difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectroscopia Mössbauer (EM),2010**

7.-Lovera,D. **Debemos Cambiar de Tecnología al paradigma de obtención de metales base cobre,** Minería & Medio Ambiente. Año 5 – N° 28, pg 20-22.Lima – PERU.