

Universidad Nacional
“José Faustino Sánchez Carrión”



“ Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica”

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**“EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE SOLUCIONES LIXIVIADAS
MEDIANTE REDUCTORES METÁLICOS PARA LA PRECIPITACIÓN
DE COBRE A NIVEL EXPERIMENTAL”**

“ TESIS”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALÚRGICO”**

Autor:

CACERES DELGADO ZOLMER MELANIO

Asesor:

M(o). PAREDES AGUIRRE, FREDY ROMAN

C.I.P. N° 95123

Huacho - Perú

2019

**“EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE SOLUCIONES LIXIVIADAS
MEDIANTE REDUCTORES METÁLICOS PARA LA PRECIPITACIÓN
DE COBRE A NIVEL EXPERIMENTAL”**



.....

M(o) Ipanaque Roña Juan Manuel

Presidente



.....

M(o) Zavaleta Sotelo, Dalila Inocente

Secretario



.....

M(o). Natividad Huasupoma, Delicias

Vocal



.....

M(o). Paredes Aguirre, Fredy Roman

Asesor

DEDICATORIA

Mi más sublime agradecimiento a los seres queridos que me dieron la vida a mamá y a papá, quienes me acompañaron desde que vi la luz hasta estos momentos, que me acompañaron durante el desarrollo personal.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios por guiarme en mi camino, a mis padres por darme la vida y apoyarme en este camino de la vida y al grupo humano de la facultad de ingeniería química y metalúrgica quienes me guiaron y aguantaron durante los 5 años de la universidad.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
INDICE GENERAL.....	v
INDICE DE TABLA.....	vii
INDICE DE FIGURA.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRAC.....	x
INTRODUCCIÓN.....	xi
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	1
1.2 Formulación del problema.....	1
1.2.1 Problema general.....	1
1.2.2 Problemas específicos.....	2
1.3 Objetivos de la investigación.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivo específico.....	2
1.4 Justificación de la investigación.....	2
1.5 Delimitación del estudio.....	3
1.5.1 Delimitación territorial.....	3
1.5.2 Coordenadas.....	3
1.5.3 Delimitación tiempo y espacio.....	3
1.5.4 Delimitación de recursos.....	4
1.6 Viabilidad del estudio.....	4
CAPITULO II MARCO TEORICO.....	5
2.1. Antecedentes de la investigación.....	5
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	5
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	6
2.1.3. Otras investigaciones.....	8
2.2. Bases teóricas.....	10

2.2.1. Hidrometalurgia	10
2.2.2. Cementación	10
2.3. Definiciones conceptuales	15
2.4. Formulación de la Hipótesis.....	16
2.4.1. Hipótesis general	16
2.4.2. Hipótesis específicas	16
CAPITULO III METODOLOGIA.....	17
3.1. Diseño metodológico	17
3.2. Población y Muestra	18
3.3. Operacionalización de las variables e indicadores.	19
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	20
3.5. Técnicas para el procesamiento de la información.....	20
CAPITULO IV RESULTADOS.....	22
4.1. Condiciones.....	22
4.1.1 Caracterización de la solución.....	22
4.2. Resultados.....	25
4.3. Procesamiento de los Resultados.	26
CAPITULO V DISCUSIONES CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
5.1. Discusiones	37
5.2. Conclusiones.....	39
5.3. Recomendaciones.....	40
CAPÍTULO VI FUENTES DE INFORMACION	41
6.1. Fuentes Bibliográficas.....	41

INDICE DE TABLA

Tabla 1. Operacionalización de las variables de estudio.....	19
Tabla 2. Densidad de la solución lixiviada.....	22
Tabla 3. Sólidos en la solución.....	22
Tabla 4. Ley de cobre en la solución.....	23
Tabla 5. Datos recopilados de las pruebas.....	25
Tabla 6. Recuperación del cobre por reductores metálicos	26
Tabla 7. Recuperación de cobre en función de los reductores metálicos	28
Tabla 8. Recuperación del cobre el 50% con el zinc.....	30
Tabla 9 Recuperación del cobre con reductor de aluminio del 50%	32
Tabla 10 Recuperación del cobre con reductor de hierro del 50%.....	34

INDICE DE FIGURA

Figura 1 Curva de recuperación del cobre con reductores metálicos.....	27
Figura 2 Curva de precipitación de cobre con reductor metálico.....	29
Figura 3 Curva de porción de la recuperación del cobre con zinc	31
Figura 4 Curva de proyección de la recuperación del cobre con zinc.....	31
Figura 5 Curva de porción de la recuperación del cobre con aluminio.....	33
Figura 6 Curva de proyección de la recuperación del cobre con hierro.....	33
Figura 7 Curva de porción de la recuperación del cobre con hierro	35
Figura 8 Curva de proyección de la recuperación del cobre con hierro.....	35

RESUMEN

En la evaluación del “tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental”, se tiene por objetivo la evaluación de la reducción del cobre mediante reductores metálicos, se desarrolló en el centro de investigación y desarrollo tecnológico de materiales, en el 2019, su contribución está orientado a la minería de supervivencia o minería artesanal y pequeñas minerías de la región. Es un trabajo experimental básico cuantitativo que tiene como finalidad medir la causa efecto de los reductores metálicos. Como resultado se tiene que, el metal reductor más eficiente es el hierro frente al zinc y aluminio con un 96,96% de recuperación frente a 91,86% y 86,50% respectivamente. El 50% de extracción es un punto de corte en la extracción del cobre, este porcentaje de extracción se da para el zinc en 7,844 minutos, mientras que para el aluminio es de 4,402 minutos y hierro de 12,482 minutos. El efecto de la precipitación en las aceleraciones se debe a que el aluminio es un metal de menor estabilidad a comparación del zinc y el hierro, pero esto cambia cuando el metal se oxida en las paredes y es protegida del flujo de electrones para su interacción de oxidación de reducción de igual manera ocurre con el zinc mientras que con el hierro no, primero pasa a hierro 2 y posterior mente pasa a hierro 3, para ello se tiene que cambiar condiciones. La electronegatividad de los elementos juega un factor importante, en este caso el más estable sería el hierro por tener mayor electronegatividad, frente al zinc y esto frente al aluminio de menor electronegatividad, esta aseveración se comprueba en el resultado de las pruebas experimentales.

Palabra clave: Precipitación de cobre, reducción de metales, oxidación reducción de cobre, recuperación de cobre de soluciones.

ABSTRAC

In the evaluation of the "treatment of leached solutions by means of metallic reducers, for the precipitation of copper at an experimental level", the objective is to evaluate the reduction of copper by means of metallic reducers, it was developed in the center for research and technological development of materials, in 2019, its contribution is oriented to survival mining or artisanal mining and small mining in the region. It is a basic quantitative experimental work that aims to measure the cause and effect of metallic reducers. As a result, the most efficient reducing metal is iron compared to zinc and aluminum with 96.96% recovery compared to 91.86% and 86.50% respectively. 50% extraction is a cut-off point in copper extraction, this extraction percentage is given for zinc in 7,844 minutes, while for aluminum it is 4,402 minutes and iron 12,482 minutes. The effect of precipitation on accelerations is due to the fact that aluminum is a metal with less stability compared to zinc and iron, but this changes when the metal oxidizes on the walls and is protected from the flow of electrons for their interaction of Reduction oxidation in the same way occurs with zinc while it does not with iron, first it goes to iron 2 and later it goes to iron 3, for this, conditions have to be changed. The electronegativity of the elements plays an important factor, in this case the most stable would be iron because it has higher electronegativity, compared to zinc and this compared to aluminum with lower electronegativity, this assertion is verified in the results of the experimental tests.

Key Word: Copper precipitation, metal reduction, oxidation reduction of copper, recovery of copper from solutions.

INTRODUCCIÓN

En la evaluación del “tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental”, el proceso de recuperación de los metales a partir de soluciones se aplica en la hidrometalurgia, siendo uno de los procesos más usados en el mundo y de menor costo a comparación del proceso de fusión.

El proceso de cementación con metales reductores es un proceso de oxidación reducción donde el cobre se metaliza y el hierro, zinc y aluminio se oxidan pasando a la solución, siendo una técnica muy sencilla que podría ser útil en la minería artesanal o pequeña minería al no emplear herramientas no muy complejas y procesos sencillos.

En el Perú más que todo en el norte chico existen minerales de cobre oxidados que fácilmente pueden tratarse por el proceso de lixiviación y recuperados por cementación, usando como reductor un elemento metálico, sin el tratamiento de las soluciones lixiviadas, directamente como sale de las pilas, luego este podría ser fundido para darle el valor agregado y su posterior comercialización.

El objetivo principal de este experimento es evaluar la eficiencia de la precipitación de cobre de soluciones lixiviadas mediante cierto reductores metálicos a través del proceso de cementación para poder determinar cuál de los reductores metálicos genera cemento de cobre con una ley optima de cobre en un menor tiempo.

Con la información obtenida en la presente investigación se espera probar que el proceso de cementación de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos para la precipitación de cobre es un tratamiento viable para la pequeña minería desde el punto de vista económico y técnico, y estos resultados se puedan emplear como base de información para otros futuros trabajos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática.

El Perú es un país netamente productor de materia prima, llegando a la concentración de los minerales y su posterior comercialización, las empresas que realizan la extracción están abocados al oro y plata.

Por otra parte, las reservas de alto valor cada día se van agotando en su mayoría sulfurados quedando minerales oxidados y de difícil su tratamiento por concentración o por flotación.

Los minerales oxidados de minerales de cobre son factibles en su extracción por medios ácidos y básicos para llevarlo a soluciones por lixiviación y su posterior recuperación, mediante la técnica más viable, que es la precipitación por oxidación reducción con agentes reductores metálicos que son más accesibles a la minera artesanal y pequeñas mineras, por ello es necesario busca los parámetros adecuados para su extracción y obtener cemento de cobre, y su posterior fundición, en vista de ello se plantea para la solución del impase, un tratamiento experimental de la solución con agente reductores metálicos como el hierro, zinc y aluminio.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera será posible realizar la evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Empleando el tiempo necesario en el proceso de precipitación con el reductor metálico a la solución lixiviada, se obtendrá un cemento de cobre con una ley óptima que satisfaga las perspectivas deseadas?
- ¿Empleando el reductor metálico de hierro, zinc y aluminio a la solución lixiviada, con cuál de ellos se tendrá un cemento de cobre óptimo que satisfaga las perspectivas deseadas respecto a su ley y recuperación?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental.

1.3.2 Objetivo específico

- Evaluar el tiempo en el proceso de precipitación con el reductor metálico, para obtener un cemento de cobre con una ley óptima que satisfaga las perspectivas deseadas.
- Evaluar el empleo del reductor metálico de hierro, zinc y aluminio, para predecir con cuál de ellos se tendrá un cemento de cobre óptimo que satisfaga las perspectivas deseadas respecto a su ley y recuperación.

1.4 Justificación de la investigación

La justificación del trabajo sobre tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental, se realizaron en el laboratorio de

hidrometalurgia del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales, el cual nos permitió encontrar los parámetros sobre la precipitación de cobre con reductores metálicos en la presente investigación, esto en base a los resultados obtenidos, nos permite ver que es factible desde el punto de vista técnico, económico y metodológicamente, validado su confiabilidad se podrá usar como base de información para otros trabajos de mejora respecto al tema en un futuro.

1.5 Delimitación del estudio

1.5.1 Delimitación territorial.

Departamento	: Lima
Provincia	: Huaura
Distrito	: Huacho
Lugar	: Centro de investigación y desarrollo tecnológico de materiales

1.5.2 Coordenadas.

Coordenada Este	: 11.126075
Coordenada Norte	: 77.609317
Cota (msnm)	: 32
Sistema de coordenadas	WGS 1984 UTM Zona 18S
Proyección	: Transverse Mercator
Datum	: WGS 84

1.5.3 Delimitación tiempo y espacio.

La investigación sobre la producción de cemento de cobre en base a los reductores metálicos, se realizaron en los ambientes del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de

Materiales de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, desde julio a noviembre del 2019.

1.5.4 Delimitación de recursos.

La delimitación que se presentó respecto los recursos son respecto de los equipos y reactivos, que se transforma en económicos, para realizar los análisis por lo que se realizaron en laboratorios de terceros.

1.6 Viabilidad del estudio

Respecto su viabilidad tiene diferente momento una sobre los ambientes que se contó con la autorización respectiva del jefe del centro de investigación y desarrollo tecnológico de materiales, por otra parte, para realizar el trabajo de investigación se tuvo la información teóricos, métodos y técnicas. De igual manera se contó con los conocimientos suficientes para realizar la investigación.

CAPITULO II MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

2.1.1. Antecedentes internacionales.

En el “**Estudio de la cementación de molibdeno sobre cinc en soluciones acuosas de hidróxido de amonio**”. Lazo (2011) concluye:

La presencia óxidos y/o hidróxidos de cinc, (...) disminución en la velocidad de remoción de molibdeno desde solución (...). Las cronoamperometrías muestran una forma de curva corriente versus tiempo que ha sido conectada en estudios previos con la formación de óxidos de molibdeno los cuales poseen baja conductividad eléctrica, bloquean parcialmente la superficie y tienen un carácter pasivante. (pp. 91-92).

En el proceso de la cementación ocurren ciertas reacciones de oxidación por la intervención del oxígeno, lo cual forman películas de óxidos que interfieren en la interacción de la oxidación reducción del proceso.

En el “**Diseño y cálculo de un sistema motriz para un reactor rotativo para la cementación de cobre, en conjunto de una valorización del sistema**”. Rojas (2019) Concluye:

La velocidad de giro (...) recomienda bajar la velocidad de operación del equipo a un rango de 0,2 – 0,35 R.P.M. como se señala en los estudios y publicaciones hechas por CODELCO dueño de la patente del cementador de cobre. De qué forma se recomienda reducir la velocidad (...) giro que se encuentre entre 1 – 2 R.P.M., (...). Para efectuar la reacción dentro del tambor de una forma eficiente se necesita chatarra de fierro con una alta superficie de contacto, por lo que los bloques de chatarra no deben ir muy prensados, (...) para obtener la recuperación deseada o si se carga con el peso correspondiente por diseño no se

agotara el cobre disuelto en el PLS (...). El diseño del equipo es muy seguro, (...) el equipo está instalado en una estructura en altura al aire libre lo que aumenta la ventilación del equipo. Ya que el cementador consta de tres secciones cada una con su pista de rodado correspondiente, (...) se recomienda prolongar el eje motriz para dejar las tres pistas de rodado motrices para así evitar el esfuerzo de torsión. (pp. 87-88).

Para una recuperación óptima se debe tener en cuenta área de contacto y una velocidad moderada para que el precipitado se desprenda de la superficie de metal reductor y así mejorar la precipitación del metal.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

En el **“Estudio cinético en la cementación del cobre utilizando metales de electro potenciales altos”**. Reyna & Rey (2009) concluyeron:

La cementación resulta más eficiente cuando es empleada la agitación en la solución, puesto que esta ofrece mayor contacto del cobre disuelto con el hierro sólido. Al incrementar la temperatura se logró que la cementación se acelerara, es decir, se aceleró la cinética de la reacción y por tanto se obtuvo un menor tiempo para precipitar casi el 100% del cobre disuelto. (.....) el ácido no se consumió durante el proceso de cementación, regenerándose por reacciones intermedias que ocurrieron durante el proceso. (Reyna & Rey, 2009, pp. 133-134).

La recuperación del cobre por cementación esta vinculado al area de contacto, por lo que si el material reductor esta de menor tamaño habra mayor contacto y por ende mayor recuperación. El hierro es el metal que actua mejor en la precipitación ya que tiene secuencias en la oxidación primero pasa a hierro mas uno luego esto a hierro mas dos.

En el estudio sobre, “Obtención del cemento de cobre mediante la descomposición de chatarra de hierro para la recuperación de cobre en volcán compañía minera, unidad Paragsha -Pasco - 2018” Espiritu (2018) concluye: “el proceso es viable económicamente. Técnicamente es factible, no necesita un gran esfuerzo de investigación y desarrollo. El proceso es sensible al precio del cobre. La recuperación del cobre presenta un 75 % con 1 573,80 kilogramos por día”. (p. 67). La recuperación de cobre con chatarra de hierro es una opción adecuada desde el punto de vista técnico y económica de acuerdo a los resultados obtenidos por la investigación realizada.

Para Amaya & Saucedo (2016) en la “influencia de la velocidad de agitación, concentración de ácido sulfúrico y temperatura sobre la extracción de cobre, por lixiviación de cemento de cobre; para la obtención de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)” concluye:

Se puede trabajar con valores de concentraciones bajas de ácido sulfúrico sin afectar la extracción, ya que se logró obtener la máxima extracción de cobre (98.05%), trabajando con el consumo teórico de ácido sulfúrico de 155 g/L y a una velocidad de agitación de 1000 rpm. Las condiciones para alcanzar una máxima extracción de cobre son las siguientes: Velocidad de agitación: 1000 rpm, Concentración de ácido sulfúrico: 155 g/L, Temperatura: 70°C, % Sólidos: 12, Insuflando aire 1.60 L/min. (...) el análisis de varianza determina que la velocidad de agitación, la temperatura influye significativamente sobre el % de extracción de cobre mediante la lixiviación con ácido sulfúrico. (pp. 44-45).

En la recuperación del cobre interviene ciertos factores, que permite mejorar la recuperación como la temperatura que acelera la cinética de precipitación y la velocidad de agitación que permite mantener la superficie de contacto libre, por lo que se puede tener una mejor precipitación.

2.1.3. Otras investigaciones.

Para Lovera, y otros (2012) en la “Cinética de la reacción de cementación de cobre a partir de minerales sulfurados del complejo Marañón” concluyo:

Lovera, y otros (2012), (...). La Caracterización empleando técnicas de difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), espectroscopia Mössbauer (EM) nos ayuda a controlar y optimizar mejor los procesos metalúrgicos. Los cementos encontrados están por encima de 70% Cobre con lo cual aumenta su valor comercial. La temperatura mejora la cinética de cementación en todo su rango más un incremento en la velocidad de agitación empeora la cinética de cementación. (...), nos permite simular las distintas condiciones de RPM, temperatura y tiempo que prefiguran la cementación del cobre. (p. 10).

En el “**Comportamiento de los iones metálicos lixiviados en la cementación del cobre**” Bustamante, y otros (2009) concluyo “Los cementos encontrados están alrededor del 90 % en base cobre. La agitación y la temperatura mejoran la cinética de cementación, hasta un cierto nivel. Se logra encontrar modelos que caracterizan la cementación del cobre” (pp. 31-32)

De la revisión de patentes internacionales, la patente 3, 282,675 de la “Inspiration Consolidated Copper Company” Maine-Arizona, “la cual muestra la importancia de obtener altas calidades de cemento de cobre a partir de cementos pobres, para así aumentar notoriamente los precios de venta haciendo rentable desde el punto de vista de producto” Parker (1966).

La Patente 3, 288,599, “para obtener una máxima recuperación como cemento de cobre, la precipitación de cobre metálico de soluciones acidificadas; al reemplazar un metal del cobre de la solución, en ausencia de impurezas en la solución podemos obtener cobre de alta pureza” Keyes (1966).

La Patente 3, 490,899 “al producir cementos de cobre, los cuales son apropiados para el refinado a fuego directo, con los consiguientes beneficios económicos evidentes. Un paso en el logro de este resultado es la separación magnética” Krivsky (1966).

La Patente 3, 874,940, “hace una descripción de la cementación del cobre a partir de soluciones salinas bajo condiciones de concentración, tiempo, agitación, los tamaños de distribución de tamaño, la calidad del hierro” Molina (1971).

A nivel nacional, se han realizado muchas experiencias de cementación de cobre, las aguas acidificadas del Túnel King Mill en Morococha, las que se efectuaron en la época de Cerro de Pasco y Centromín Perú, entre otros Lovera (2005).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Hidrometalurgia.

La hidrometalurgia es cualquier proceso por vía húmeda contempla los procesos de lixiviación, purificación y/o concentración y cementación, previo preparación física y química (Ballestes, Verdeja, & Sancho, 2000).

Por otra parte, se puede mencionar que los procesos de extracción de los metales a partir de los minerales por medio acuosos es la hidrometalurgia.

En el proceso hidrometalurgia consiste en varios procesos, la extracción de metales desde la corteza terrestre, mediante la lixiviación, luego la recopilación de la solución. La extracción de los elementos metálicos de interés consiste adicionar sales en soluciones a los minerales o a la corteza terrestre luego se recupera la solución en piscinas.

La solución obtenida de la lixiviación pasa a una purificación que consiste en la eliminación de los elementos no deseados, que consiste separación solida líquido, precipitación, etc.

Posterior mente esta recuperación a partir de la solución se puede extraer por medio de varios procesos como la electrodeposición, intercambio iónico, adsorción, cementación, etc.

El proceso de cementación consiste en la reducción oxidación donde los elementos que se encuentran en la solución de interés se reducen previo ingreso de un elemento metálico que se oxida de menor estabilidad. Los iones metálicos de interés se precipitan y el metal adicionado pasa a la solución donde existe un intercambio iónico, como producto se obtiene el precipitado conocido como cemento.

2.2.2. Cementación.

El proceso de cementación es una “reducción electroquímica de un ion metálico de la solución añadiendo un metal menos noble en la solución o pasando la solución sobre un metal menos noble” (Shamsuddin, 2016, pág. 495). Por otra parte, Courtney (2019) describe: “La

cementación es un proceso en el cual se involucra una reacción por contacto de un metal desde una solución acuosa por otro metal más electropositivo” (p. 1359). En el proceso ocurre que un metal pierde un electro y el otro gana.



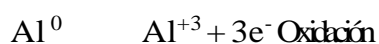
Por otra parte, esta fundamentado que los metales nobles se metalizan y los metales neor noble se disocian en la solución. Courtney (2019) define: “Un metal más noble, que se encuentra en la forma iónica en solución, desplaza en su estado sólido, a un metal menos noble que se pone en contacto con dicha solución” (pp. 1360-1366).

2.2.2.1. Cementación del Cobre en solución por diferentes reductores.

Dentro del proceso de cementación ocurre una oxidación y reducción. Kumar (2003) define que: “El reactivo que adquiere electrón (es) del otro reductor se reduce y se llama agente oxidante, mientras que el reactivo que se separa con los electrones al otro reactivo se oxida y se llama agente reductor” (p. 625).

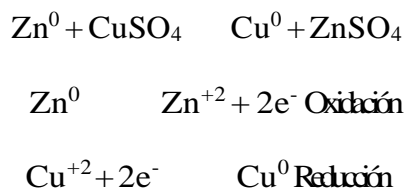
La reacción para los metales aluminio, fierro y zinc respectivamente se muestran en las siguientes reacciones:

Aluminio. El proceso de reducción del cobre por medio de aluminio está dado por la siguiente reacción. Demirkiran & Kunkul (2011) :



El resultado de la reacción se podría describir de la reacción el cobre iónico precipita y el aluminio metálico se ioniza en la solución (p.2780).

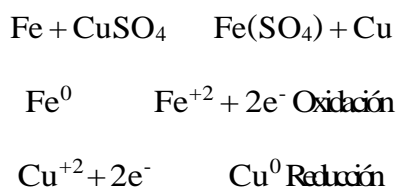
Zinc. La reacción de la cementación del cobre con el reductor de zinc, es de acuerdo la siguiente reacción. Demirkiran, Ekmekyapar, Künkül, & Baysar (2007):



En lo que se podría ver la reducción del cobre y la oxidación del zinc (p. 82).

Hierro. La reducción del hierro está establecido de acuerdo a la siguiente reacción.

Stefanowicz & Osifiska (1996):



De acuerdo a las reacciones de oxidación-reducción, Stefanowicz & Osifiska (1996) describen: “los iones de cobre se reducen fácilmente, con una cantidad similar del hierro que pasa a la solución acuosa” (p. 70).

En la cementación de mayor influencia, Karavasteva (2005) fundamenta: “el aluminio sustancialmente más lento que el hierro o el zinc y se disolvió significativamente menos, la tasa de cementación más alta usando zinc; y el hierro el mejor sustrato para la cementación” (p.149).

2.2.2.2. Situaciones en la que se emplea la cementación

En el proceso de la cementación se tiene que tener en cuenta que las cementaciones suelen emplearse en dos tipos de situaciones. Doyle & Woods (2000) menciona:

Obtención del metal: Lixiviación de Cobre muy diluido y/o con impurezas elevadas.

Lixiviados concentrados con cationes que interferirían en la electrolisis: Cationes con potencial de reducción superior al del metal a recuperar precipitará conjuntamente con él en la electrolisis.

La limpieza de estos cationes se suele realizar por cementación, dejando al lixiviado libre de ellos.

2.2.2.3. Interferencias en la precipitación.

Dentro del proceso de precipitación por intercambio iónico existe ciertas interferencias dentro del proceso de cementación como:

El Oxígeno: Es uno de los elementos que consume el hierro, con su potencial de reducción “+1,2 V, superior al de la mayoría de metales, debe ser eliminado en lo posible de la disolución” (Canahua, 2014, pág. 24).

Iones de Hidrogeno (H^+): “Pueden reducirse y formar H_2 . Para prevenir este fenómeno lo que se hace es disminuir la concentración de protones, aumentar el pH, aunque ello conduce a formación de hidróxidos, con ello la disminución de la velocidad de reducción” (Canahua, 2014, pág. 25).

Reacción que producen la pasivación: “la oxidación del aluminio conduce a la formación de una capa de alúmina (óxido de aluminio) en su superficie impidiendo el progreso de la reacción de oxidación” (Canahua, 2014, pág. 25).

2.2.2.4. Factores que afectan la velocidad de cementación.

En el proceso de cementación existen ciertas condiciones o factores que afectan la cementación del cobre los más resaltantes. Rumbu (2018) témenos las siguiente:

La diferencia de potencial del par galvánico: Cuanto mayor es la diferencia de potencial del par galvánico, más rápido es el proceso.

La cantidad de oxígeno disuelta en el lixiviado: La reducción efectiva que perseguimos obtener no se inicia hasta que no se consume todo el oxígeno disuelto.

El pH: La variación de pH afecta a la cementación de diferentes maneras.

pH alto: Formación de hidróxidos, bajas velocidades de reducción ya que los hidróxidos deben descomponerse antes para que el catión se reduzca.

pH bajo: Tenemos un elevado consumo de cementante, ya que además del metal, también el H^+ se reducirá.

2.3. Definiciones conceptuales.

- a. **Cementación:** “La cementación es la precipitación de un metal desde una solución acuosa, que se produce por efecto de la presencia de otro metal” (Domic & Esteban, 2001).
- b. **Oxidación:** Es un proceso por el cual un elemento pierde carga. Teijón, Garcia, Jimenez, & Guerrero (2006) define: “Es un fenómeno en el cual un elemento en el proceso pierde electrones por parte de una molécula, átomo o ion” (p. 217).
- c. **Reducción:** Es el proceso donde un elemento gana una carga. Teijón, Garcia, Jimenez, & Guerrero (2006, pág. 217) define: “Es el proceso electroquímico por el cual un átomo o un ion gana electrones. Implica la disminución de su estado de oxidación” (p. 217)
- d. **Solución:** Se puede definir. “Es una mezcla homogénea a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias puras que no reaccionan entre sí, cuyos componentes se encuentran en proporciones variables” (Mantell, 2003).
- e. **Electrolisis:** “Es una solución acuosa o sales disueltas que den la posibilidad a los iones” (Gillespie, 1990, p. 732).
- f. **Interferencias:** Es aquella sustancia que causa un error sistemático en la determinación del analito de una magnitud relativa igual o superior a un valor establecido.
- g. **Pasivación:** “Es la formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un metal” (Molera, 1990).
- h. **Lixiviado:** “Es el líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido” (Mantell, 2003).
- i. **pH:** “Es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia” (Kotyk & Slavik, 1989).

2.4. Formulación de la Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Realizando una evaluación adecuada del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, se podrá obtener una óptima precipitación de cobre a nivel experimental.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Empleando el tiempo necesario en el proceso de precipitación con el reductor metálico a la solución lixiviada, se obtendrá un cemento de cobre con una ley óptima que satisfaga las perspectivas deseadas.
- Con el empleo de los reductores metálicos de hierro, zinc y aluminio a la solución lixiviada, se obtendrá un cemento de cobre óptimo que satisfaga las perspectivas respecto a su ley y recuperación.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Tipo de investigación

Respecto a la investigación será investigación básica. “No tiene propósitos aplicativos inmediatos, solo busca ampliar y profundizar el conocimiento científico existente acerca de la realidad” (Carrasco, 2005, p. 42). La investigación básica porque se realizará experimentos al nivel de laboratorio con un control mínimo control con el fin de conocer los efectos con fines de comprobar la precipitación del cobre.

3.1.2. Nivel de investigación

Para el presente estudio, el nivel de investigación es predictiva o experimental. “Se aplicará métodos y técnicas para mejorar y corregir la situación problemática, que da origen al estudio de investigación” (Carrasco, 2005, p. 42). En el trabajo se nivel experimental porque se someterá como los reductores metálicos actúan frente a la precipitación del cobre en el tiempo.

3.1.3. Diseño de la investigación.

Por realizar manipulación de las variables independientes a nivel laboratorio, el diseño es experimental. “La finalidad de observa su efecto sobre la variable dependientes” (Fernandez, 2014, p. 129). El trabajo se someterá en qué medida la precipitación del cobre se comporta frete a los reductores metálicos.

3.1.4. Enfoque de la investigación.

Respecto al enfoque del estudio es cuantitativo, ya que fenómenos son cuantificables o fácilmente mensurables. “Utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base a medición numérica y análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teoría” (Fernandez, 2014, p. 3-4). En la presente investigación se cuantificará los datos numéricos para poder establecer numéricamente la recuperación del cobre.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población.

Estará representado por la solución de la lixiviación de minerales de cobre, previamente lixiviadas.

3.2.2. Muestra.

La muestra para las pruebas experimentales de investigación se extraerá de la solución lixiviada de cobre, aproximadamente de 500 mL para cada prueba experimental.

3.3. Operacionalización de las variables e indicadores.

Para la operación de las variables sobre el estudio de la “evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental” se describe en la tabla 1.

Tabla 1

Operacionalización de las variables de estudio.

Variable	Concepto	Dimensiones	Indicador
Independiente			
Evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas	- Proceso de toma de decisiones para emplear el tiempo para la interacción del electrolito y el metal reductor a emplear	Medida	- Tiempo - Reductor metálico Fe, Zn, Al
Dependiente			
Precipitación de cobre	- Es el proceso por el cual, el cobre que se encuentra en la solución en forma de electrolito pase a metalizarse, por el proceso de oxidación reducción.	Calidad	- Ley - Recuperación
Intervinientes.			
Factores no evaluables	- Son aquellas que no se modifican en el proceso de estudio	Control	- Densidad de solución. - pH. - Concentración de ácido. - Agitación.

Fuente: Diseñado por el autor de acorde las variables de estudio.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas a emplear.

En el trabajo sobre la evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre, las técnicas empleadas son:

a. Observación sistemática directa.

Se emplearon esta técnica, en el momento del experimento sobre precipitación del cobre, mediante los reductores metálicos en la investigación que se desarrollaron, con la finalidad de obtener datos del proceso y luego fueron procesados.

b. Observación sistemática indirecta.

Para la fundamentación de la investigación acudieron a fuentes bibliográficas, tanto de libros, tesis, revistas y otros documentos que contiene información sobre el tema de investigación. Con la finalidad de darle sustento a la investigación desarrollada.

c. Observación experimental.

Esta técnica se empleó para observar los efectos que se produjeron durante el desarrollo de las actividades en el parte experimental, para luego enriquecer e fundamentar el resultado en el análisis de los datos.

3.4.2. Descripción de los instrumentos.

Los instrumentos empleados en la evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre para la recopilación de datos se usaron ficha de observaciones, para el registro de los resultados, la lista de cotejo para registrar las observaciones encontrados, y equipos que tiene cámara, video y grabación, que se registraron en el proceso de la investigación experimental.

3.5. Técnicas para el procesamiento de la información.

En el trabajo sobre evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre, al ser cuantificable y analizable se emplearon la

matemática y la estadística, con ello se procesó los datos para determinar los promedios, desviaciones, proyecciones, etc., mediante tablas gráficos, para ellos se emplearon minitab 18 y la hoja de cálculo Excel. Para la digitalización se empleó el procesamiento de texto Word y para el almacenamiento el pdf.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Condiciones.

4.1.1 Caracterización de la solución.

La muestra de la solución proveniente de la lixiviación, para el proceso de la precipitación con los reductores metálicos tiene las siguientes condiciones:

Tabla 2

Densidad de la solución lixiviada

Muestra	W fiola (g.)	W fiola+agua (g.)	W agua (g.)	V fiola (cm ³)	Solución CuSO ₄ (g/cm ³)
1	12,73	23,04	10,31	10	1,031
2	13,63	23,95	10,32	10	1,032
Promedio					1,0315

Fuente: Elaboración propia del autor.

La solución del lixiviado del sulfato de cobre es en promedio de 1,0315 g/cm³ o t/m³ que se halló por el método de la fiola.

Tabla 3

Sólidos en la solución

Crisol	W crisol (g.)	W crisol+sol. (g.)	W c+s (seca g.)	W sol. (seca g.)
1	33,4229	42,9577	33,8423	0,4193
2	27,7539	37,1933	28,1722	0,4183
3	27,9790	37,5454	28,4121	0,4331
Promedio				0,4236

Fuente: Elaboración propia del autor.

Datos obtenidos:

V:	10 cm ³
:	1,0315 g/cm ³
Masa:	10,315 g
Muestra seca:	0,4236 g
% Sólido:	4,107 %

El porcentaje de sólidos en la solución lixiviado es de 4,107% respecto al peso de la solución, para ello se emplearon un volumen de 10 mL de solución, luego se evaporo y acto seguido de enfriaron en el desecador y pesado con balanza analítica de 4 dígitos.

Tabla 4

Ley de cobre en la solución

Muestra	Medida (ml.)	V. Gast. (mL)
1	1	6,80
2	1	7,00
3	1	6,20
Promedio	1	6,67
% Cu	Masa (g.) Cu	Concentración (g./L) Cu
1,4016	0,01446	14,4578

Fuente: Elaboración propia del autor.

La concentración y la ley del cobre en solución se calcularon por método volumétrico lo cual se hallaron por triplicado y el resultado es de 1,4016% de cobre que es equivalente a 14,4578 g/L.

- El volumen de la muestra para la prueba es de 500 mL.

- Reductor hierro, zinc y aluminio.
- Rodillo para las pruebas de precipitación.
- Tiempo de pruebas 50 minutos.
- Extracción de muestra cada 5 minutos.

4.2. Resultados.

El resultado de las muestras realizado durante los tiempos programados por cada reductor metálico por duplicado de zinc, aluminio y hierro.

Tabla 5

Datos recopilados de las pruebas

N°	Tiempo Minutos	%Cu (AL)		g/L Cu (AL)		%Cu (Zn)		g/L Cu (Zn)		%Cu (Fe)		g/L Cu (Fe)	
		P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂
1	0	1,40	1,40	14,46	14,46	1,38	1,36	14,25	14,03	1,40	1,40	14,46	14,46
2	5	0,65	0,63	6,72	6,51	1,07	0,97	11,06	9,98	1,30	1,24	13,45	12,80
3	10	0,59	0,57	6,07	5,86	0,57	0,57	5,86	5,86	1,11	0,80	11,49	8,24
4	15	0,50	0,46	5,20	4,77	0,40	0,46	4,12	4,77	0,61	0,53	6,29	5,42
5	20	0,48	0,44	4,99	4,55	0,29	0,34	3,04	3,47	0,32	0,27	3,25	2,82
6	25	0,46	0,42	4,77	4,34	0,27	0,27	2,82	2,82	0,17	0,24	1,73	2,44
7	30	0,42	0,25	4,34	2,60	0,25	0,23	2,60	2,39	0,12	0,19	1,23	2,01
8	35	0,32	0,23	3,25	2,39	0,23	0,21	2,39	2,17	0,09	0,17	0,94	1,73
9	40	0,29	0,21	3,04	2,17	0,21	0,19	2,17	1,95	0,07	0,12	0,76	1,24
10	45	0,25	0,19	2,60	1,95	0,13	0,12	1,34	1,26	0,07	0,09	0,67	0,95
11	50	0,21	0,17	2,17	1,73	0,13	0,12	1,34	1,21	0,04	0,06	0,40	0,58

Fuente: Elaboración propia del autor.

En la tabla 5 se detalla los resultados de las 11 muestras por duplicado por cada reductor tanto en porcentaje y g/L de cobre, haciendo un total de 66 para el % de cobre y 66 g/L de cobre, 50 minutos para el reductor aluminio es 0,21%, 0,17% y 2,17g/L, 1,73 g/L. Para el zinc es de 0,13%, 0,12% y 1,34g/L, 1,21 g/L. Mientras que para el hierro es de 0,04%, 0,06% y 0,40 g/L, 0,58 g/L.

4.3. Procesamiento de los Resultados.

Las pruebas experimentales de realizaron con los reductores metálicos de zinc, aluminio, hierro por duplicado y el muestreo era de cada 5 minutos durante 50 minutos y obteniendo 10 muestras por triplicado los resultados se aprecian en la tabla 5.

a. Resultado General

Tabla 6

Recuperación del cobre por reductores metálicos

Tiempo Minutos	Recuperación (%) Zn		Recuperación (%) Al		Recuperación (%) Fe	
	Zn (1)	Zn (2)	Al (1)	Al (2)	Fe (1)	Fe (2)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	23,15	29,61	53,50	55,00	7,93	12,39
10	59,73	59,10	58,00	59,50	22,09	44,14
15	71,95	67,02	64,00	67,00	57,81	63,63
20	79,54	76,26	65,50	68,50	78,40	81,28
25	81,20	80,91	67,00	70,00	88,60	84,00
30	82,83	84,02	70,00	82,00	91,98	86,94
35	84,43	85,63	77,50	83,50	93,99	88,85
40	86,00	87,20	79,00	85,00	95,15	92,12
45	91,41	91,84	82,00	86,50	95,77	94,04
50	91,51	92,21	85,00	88,00	97,53	96,38

Fuente: Elaboración propia del autor.

De la tabla 5 la recuperación del cobre por los reductores metálicos se tiene los siguientes resultados. El tiempo transcurrido es de 50 minutos para lo cual empleando el zinc como reductor del cobre se tiene dos pruebas experimentales de los cuales el primer se recupera 91,51% en el segundo de 92,21%, mientras que para el aluminio se tiene de 85,00% en la primera prueba y en la segunda prueba de 88,00% y para el hierro la primera de 97,53% y la segunda de 96,38%.

La curva de precipitación del cobre por el aluminio, zinc y hierro se parecía en la figura 1 que se aprecia a continuación.

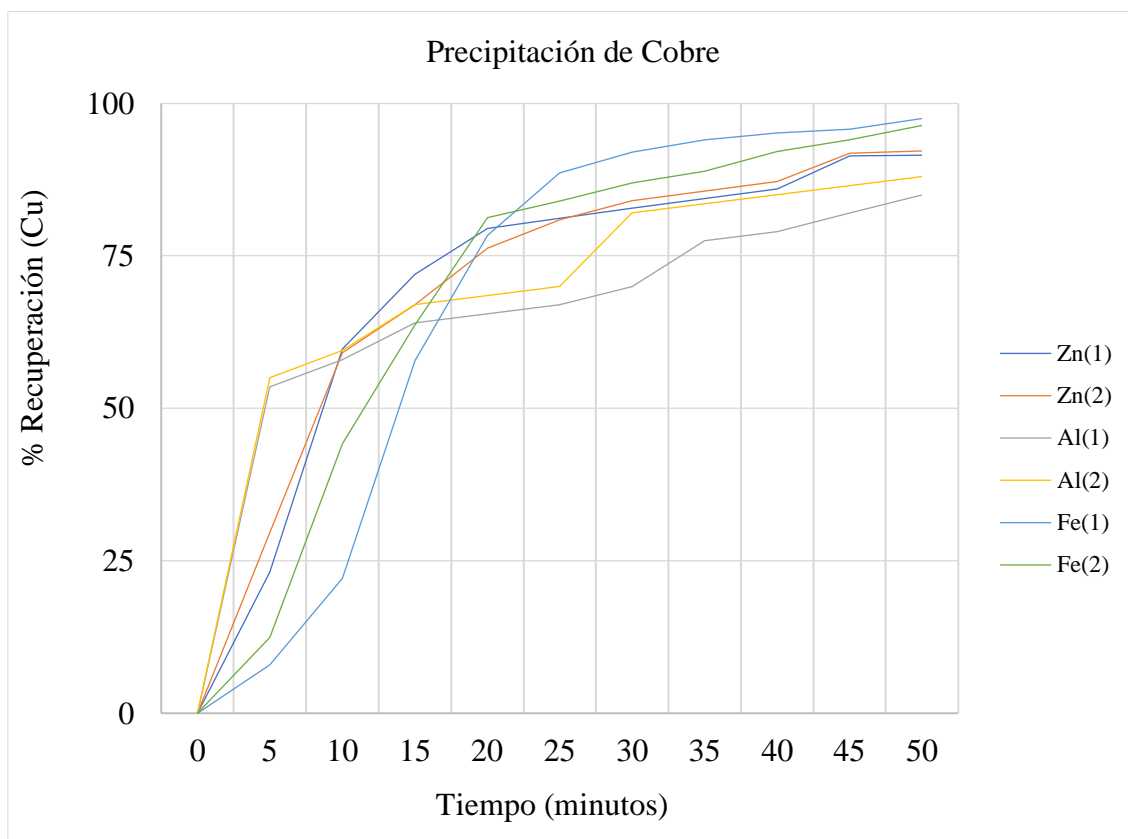


Figura 1. Curva de recuperación del cobre con reductores metálicos. Fuente: figura obtenida del software EXCEL.

En la figura 1 la curva de recuperación de cobre es la del hierro en la primera prueba, seguido de la segunda prueba del hierro. El zinc tiene tercer lugar con la prueba 2, cuarto del zinc con la primera prueba. Mientras que para el aluminio es la quinta con la segunda prueba y por último el aluminio con la primera prueba. El efecto del aluminio es más rápido en los 5 minutos precipitando el mayor al 50% seguido por el zinc precipitando el mayor al 40% y en tercer lugar el hierro solo aproximadamente el mayor al 10%.

Tabla 7

Recuperación de cobre en función de los reductores metálicos

Tiempo Minutos	% Recuperación de Cobre			% Cobre en solución		
	Zn (Recup)	Al Recup	Fe(Recup)	Zn Sol	Al (Sol.)	Fe (Sol.)
0	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
5	26,38	54,25	10,16	73,62	45,75	89,84
10	59,41	58,75	33,12	40,59	41,25	66,89
15	69,48	65,50	60,72	30,52	34,50	39,29
20	77,90	67,00	79,84	22,10	33,00	20,16
25	81,06	68,50	86,30	18,94	31,50	13,70
30	83,42	76,00	89,46	16,58	24,00	10,54
35	85,03	80,50	91,42	14,97	19,50	8,58
40	86,60	82,00	93,63	13,40	18,00	6,37
45	91,63	84,25	94,90	8,37	15,75	5,10
50	91,86	86,50	96,96	8,14	13,50	3,04

Fuente: Elaboración propia del autor.

De la tabla 6 la recuperación promedio en 10 minutos es de 59,41% recuperada del cobre con zinc y quedando el 40,59% en la solución. Cuando se trabajó con el aluminio se tiene una recuperación 58,75% quedando 41,25% en la solución. Mientras que para el hierro se tiene 33,12% y quedando 66,89% en la solución.

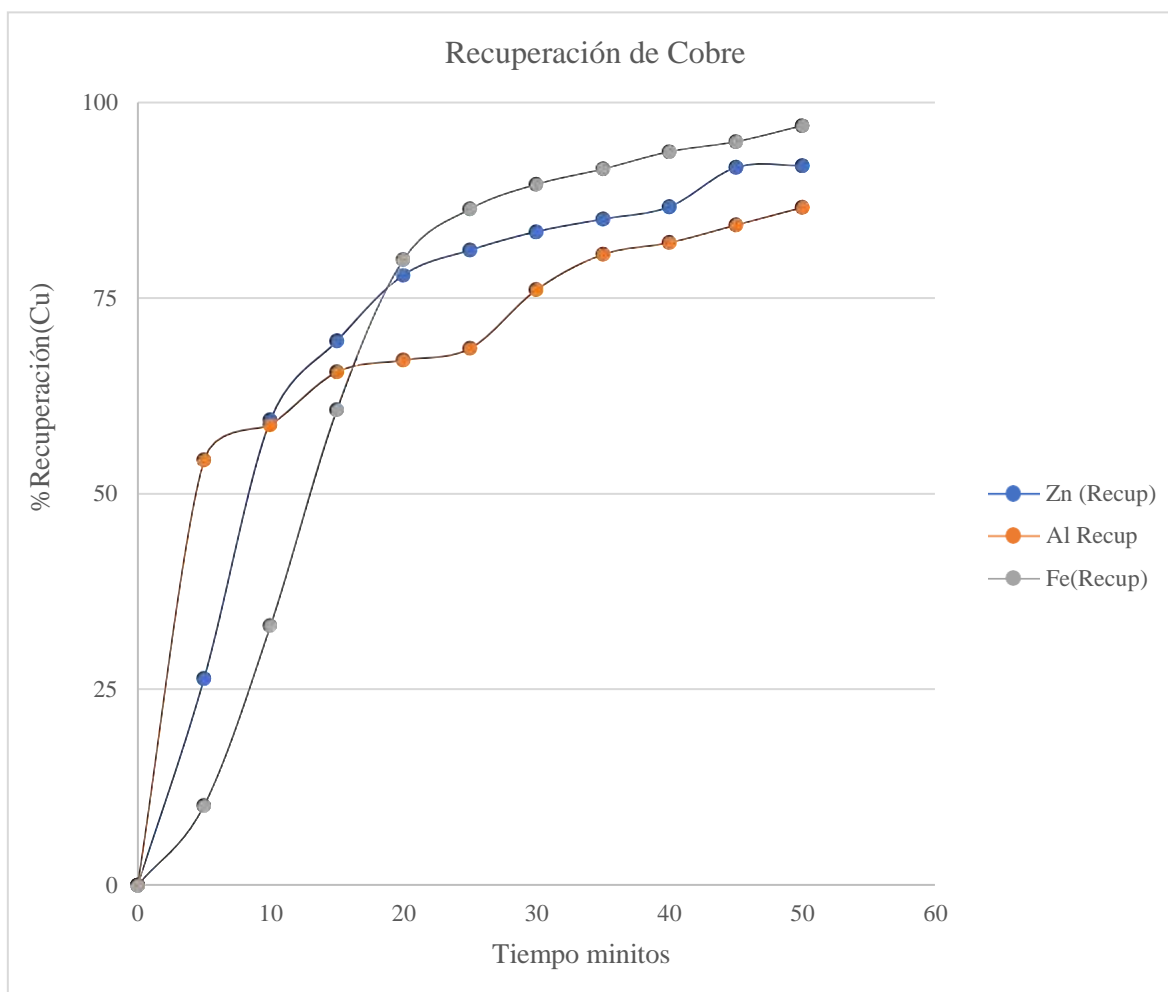


Figura 2. Curva de precipitación de cobre con reductor metálico. *Fuente:* figura obtenida del software EXCEL.

De la figura 2 el efecto del aluminio en los 10 minutos es más efectivo, luego decae en la recuperación, mientras que el aluminio en los 10 a 20 minutos tiene un mayor efecto en la recuperación luego decae respecto al hierro, que después pasado los 20 minutos la recuperación aumenta respecto al aluminio y el zinc.

b. Resultado Recuperación 50% con Zinc.

Tabla 8

Recuperación del 50% de cobre con reductor metálico de zinc

Tiempo minutos	% Cu Solución	%Recuperación Cu	Tiempo (min) 50% Precipitado
0	100,000	0,000	0,000
5	73,618	26,382	7,844
10	40,585	59,415	0,000
15	30,517	69,483	0,000
20	22,098	77,902	0,000
25	18,943	81,057	0,000
30	16,575	83,425	0,000
35	14,972	85,028	0,000
40	13,400	86,600	0,000
45	8,373	91,627	0,000
50	8,141	91,859	0,000

Fuente: Elaboración propia del autor.

De la tabla 7 la recuperación del cobre con el reductor del zinc en un periodo de 7,844 minutos en promedio del 50% de cobre precipitado y en 50 minutos se tiene una recuperación de 91,859% y un residual de 8,141%.

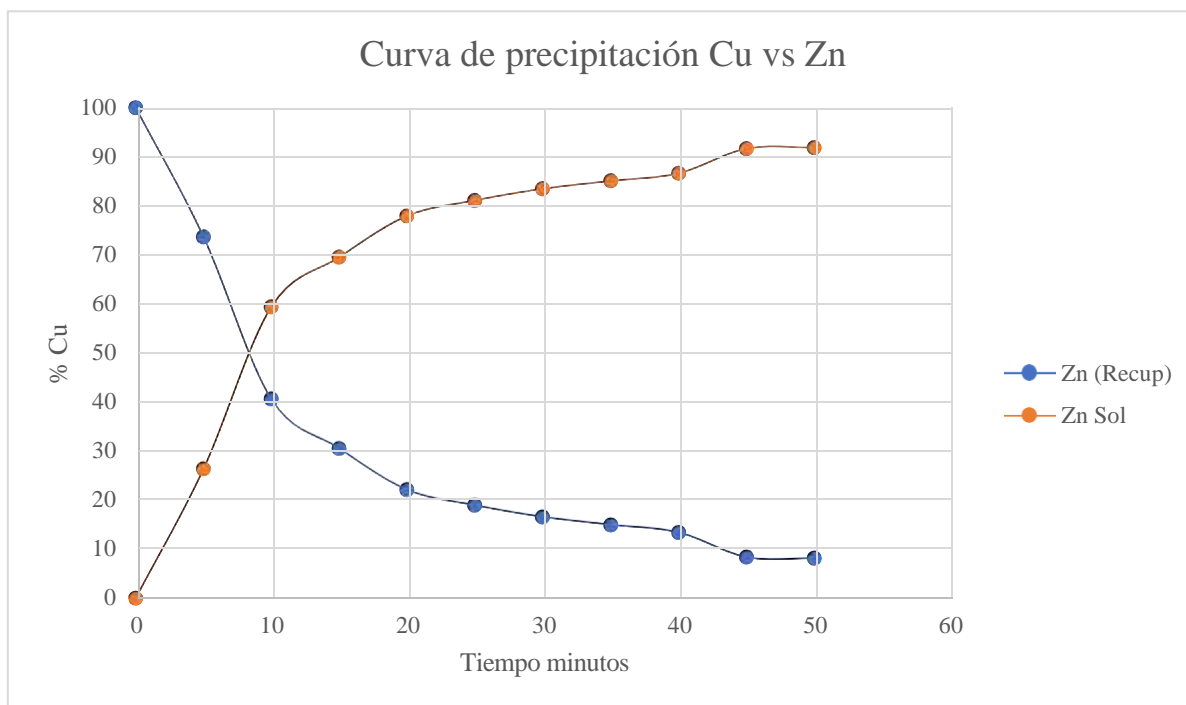


Figura 3. Curva de porción de la recuperación del cobre con zinc. Fuente: figura obtenida del software de EXCEL.

De la figura 3 la curva de partición de la recuperación del cobre con el reductor del zinc está en un periodo de 7,844 minutos.

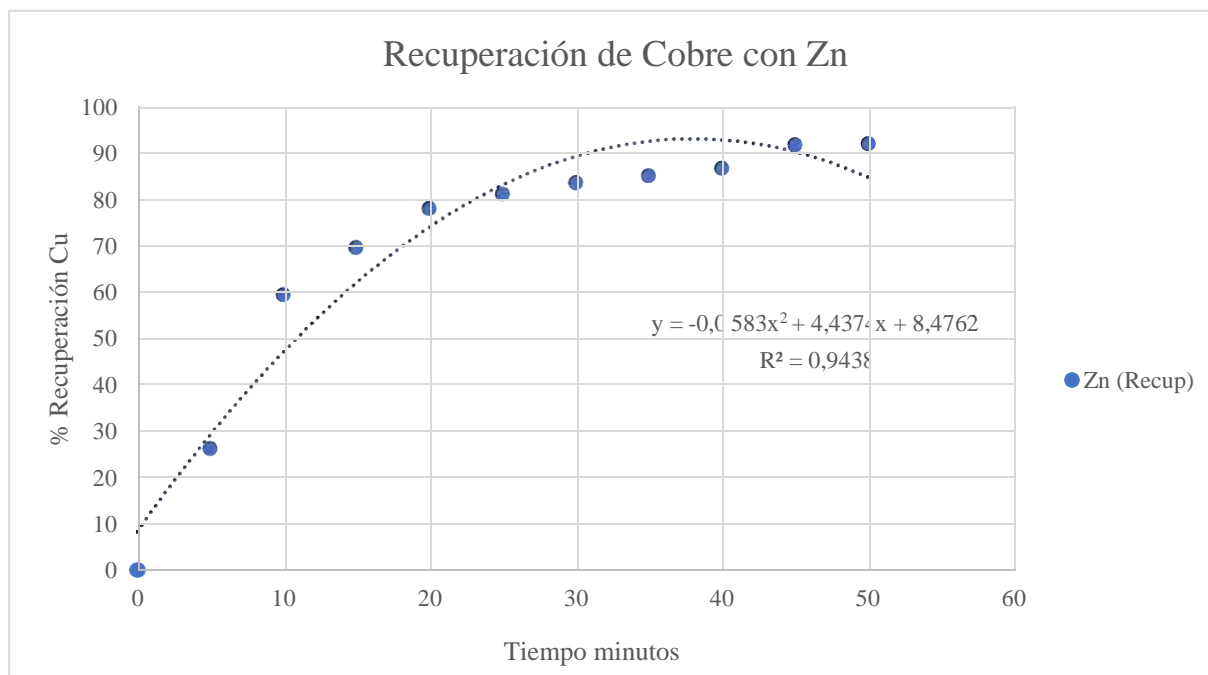


Figura 4. Curva de proyección de la recuperación del cobre con zinc Fuente: figura obtenida del software de EXCEL.

En la figura 4 se aprecia la curva de tendencia de la recuperación de cobre representado por la ecuación: $\text{Recuperación (Cu)} = -0,0583(\text{minutos})^2 + 4,4374(\text{minutos}) + 8,4762$, con un coeficiente de correlación de 0,9438 ($R^2 = 0,9075792$).

c. Resultado Recuperación 50% con Aluminio.

Tabla 9

Recuperación del 50% de cobre con reductor metálico de aluminio

Tiempo minutos	% Cu Solución	%Recuperación Cu	Tiempo (min) 50% Precipitado
0	100,000	0,000	4,402
5	45,750	54,250	0,000
10	41,250	58,750	0,000
15	34,500	65,500	0,000
20	33,000	67,000	0,000
25	31,500	68,500	0,000
30	24,000	76,000	0,000
35	19,500	80,500	0,000
40	18,000	82,000	0,000
45	15,750	84,250	0,000
50	13,500	86,500	0,000

Fuente: Elaboración propia del autor.

De la tabla 8 la recuperación del cobre con el reductor del aluminio en un periodo de 4,402 minutos en promedio del 50% de cobre precipitado y en 50 minutos se tiene una recuperación de 86,500% y un residual de 13,500%.

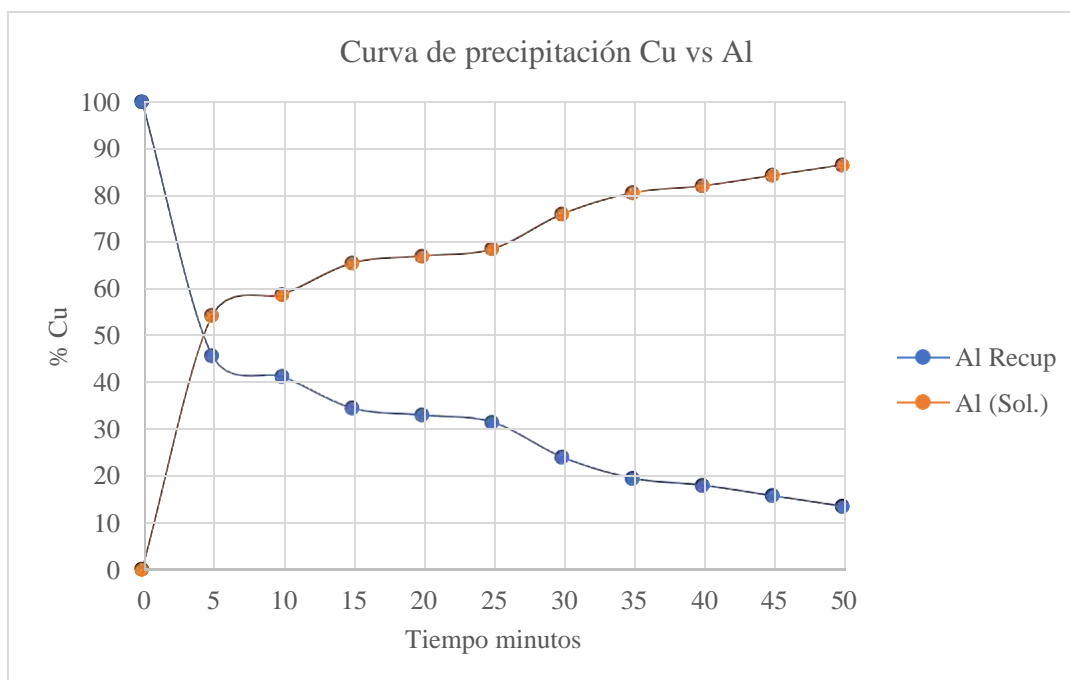


Figura 5. Curva de porción de la recuperación del cobre con aluminio. Fuente: Figura obtenida del software de EXCEL.

De la figura 5 la curva de partición de la recuperación del cobre con el reductor del zinc está en un periodo de 4,402 minutos.

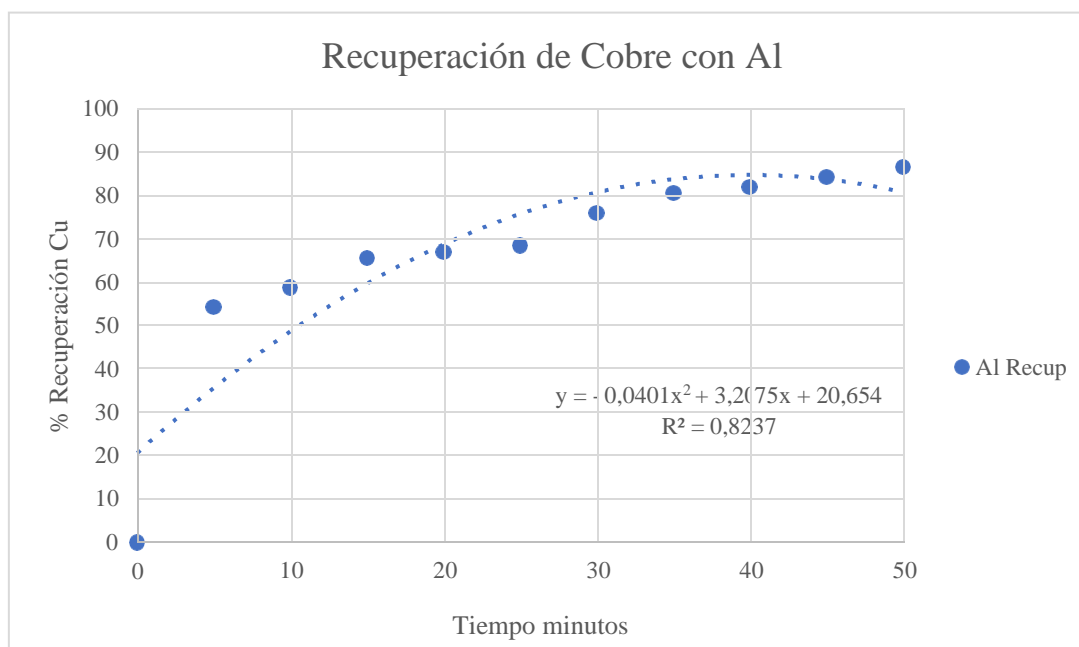


Figura 6. Curva de proyección de la recuperación del cobre con hierro. Fuente: Figura obtenida del software de EXCEL

En la figura 6 se aprecia la curva de tendencia de la recuperación de cobre representado por la ecuación: $\text{Recuperación (Cu)} = -0,0401(\text{minutos})^2 + 3,2075(\text{minutos}) + 20,654$, con un coeficiente de correlación de $0,8237(R^2 = 0,9075792)$.

d. Resultado Recuperación 50% con Hierro.

Tabla 10

Recuperación del 50% de cobre con reductor metálico de hierro.

Tiempo minutos	% Cu Solución	%Recuperación Cu	Tiempo (min) 50%Precipitado
0	100,000	0,000	0,000
5	89,843	10,158	0,000
10	66,885	33,115	12,482
15	39,285	60,715	0,000
20	20,160	79,840	0,000
25	13,700	86,300	0,000
30	10,542	89,458	0,000
35	8,584	91,416	0,000
40	6,367	93,633	0,000
45	5,095	94,905	0,000
50	3,041	96,959	0,000

Fuente: Elaboración propia del autor.

De la tabla 9 la recuperación del cobre con el reductor del hierro en un periodo de 12,482minutos en promedio del 50% de cobre precipitado y en 50 minutos se tiene una recuperación de 96,959% y un residual de 3,041%.

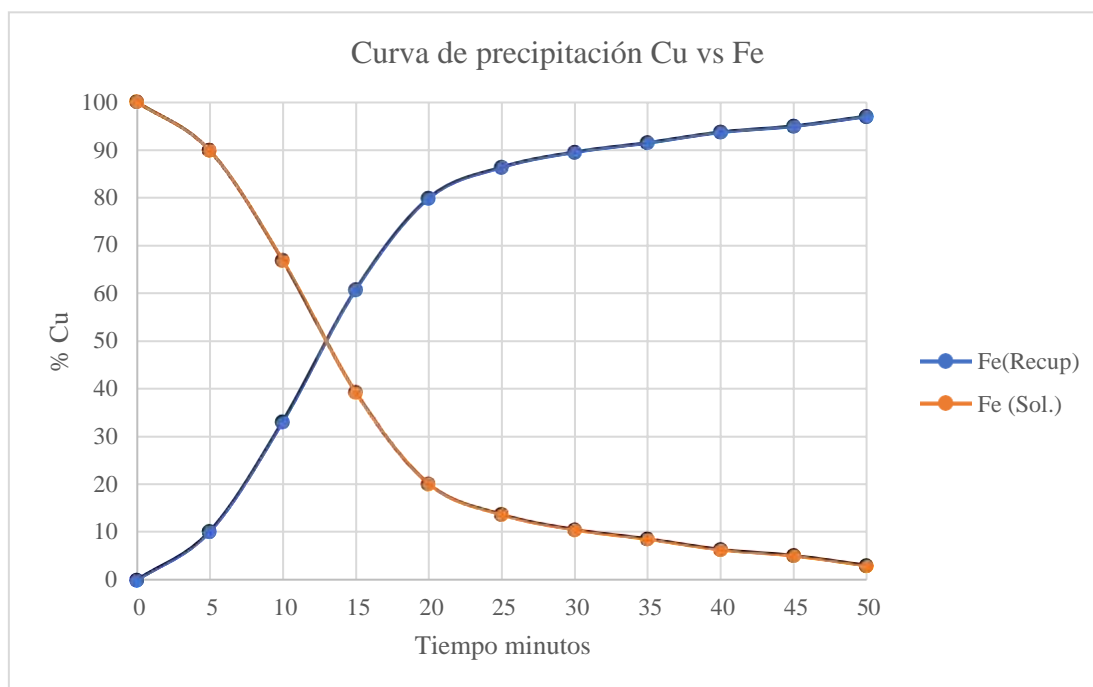


Figura 7. Curva de porción de la recuperación del cobre con hierro. Fuente: Figura obtenida del software de EXCEL.

De la figura 7 la curva de partición de la recuperación del cobre con el reductor del zinc está en un periodo de 12,482 minutos.

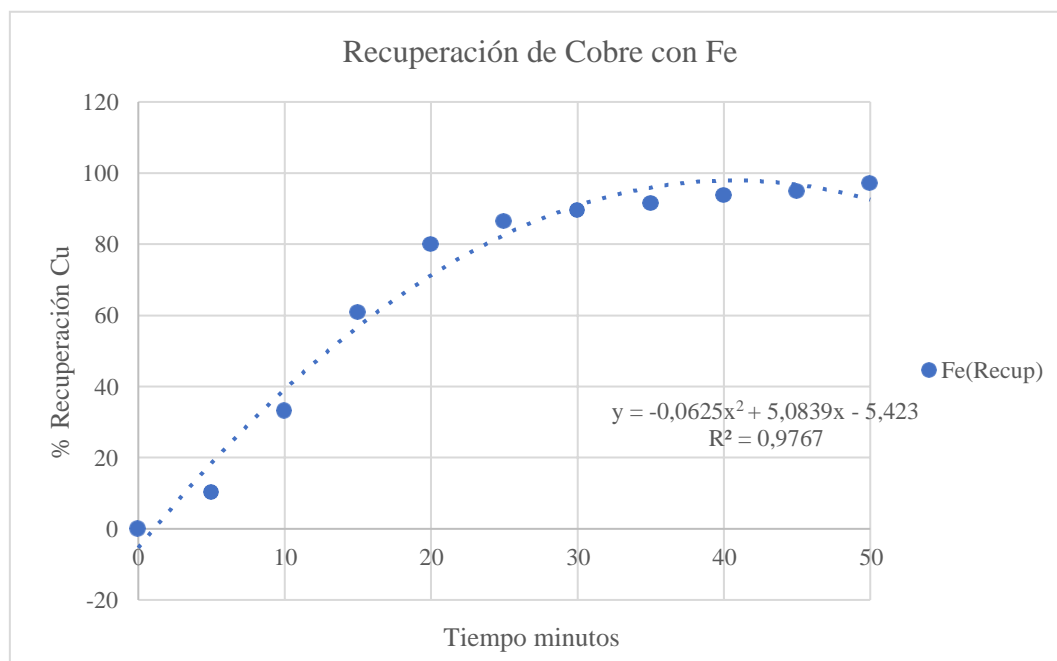


Figura 8. Curva de proyección de la recuperación del cobre con hierro. Fuente: figura obtenida del software de EXCEL

En la figura 8 se aprecia la curva de tendencia de la recuperación de cobre representado por la ecuación: $\text{Recuperación (Cu)} = -0,0625(\text{minutos})^2 + 5,0839(\text{minutos}) - 5,423$, con un coeficiente de correlación de 0,98828 ($R^2 = 0,9767$).

CAPITULO V

DISCUSIONES CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Discusiones.

El resultado de las pruebas de precipitación del cobre por medio de reductores metálicos, sobre la evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre. Las condiciones de la solución lixiviada tienen una densidad de $1,0315 \text{ g/cm}^3$, con porcentaje de sólido de 4,107%, con una ley de 1,4016 % o 14,4578 g/L. El tiempo de muestreo fue cada 5 minutos durante 50 minutos, para cada reductor se emplearon 2 corridas, partiendo de un volumen de 500mL.

Las recuperaciones de las pruebas para cada reductor fueron, para el aluminio fueron de 91,51% y 92,21%, mientras que para el aluminio fue de 85,00% y 88,00% y para el hierro fue de 97,53% y 96,38%.

La recuperación en promedio en 10 minutos es de 59,41% con zinc y quedando el 40,59%, con el aluminio se tiene 58,75% quedando 41,25%, mientras que para el hierro se tiene 33,12% y quedando 66,89% en la solución.

Mientras que en 50 minutos se tiene 91,86% con zinc y quedando el 8,14%, con el aluminio se tiene 86,50% quedando 13,50%, mientras que para el hierro se tiene 96,96% y quedando 3,04% en la solución.

El efecto de metalización de prioridad en los 10 primeros minutos se tiene aluminio, zinc y hierro; posteriormente cambia a zinc, aluminio y hierro posteriormente hierro, zinc y aluminio.

El 50% de metalización del cobre se realiza en el orden, cuando se empela el zinc el tiempo es de 7,844 minutos, para el aluminio en 4,402 minutos y el hierro lo hace en 12,482 minutos.

La precipitación del cobre está representada de en función del tiempo por un modelo matemático esto sería lo siguiente: Para el hierro: Recuperación (Cu) = $-0,0625(\text{minutos})^2 + 5,0839(\text{minutos}) - 5,423$, con un coeficiente de correlación de 0,98828, mientras que para el aluminio es la relación matemática de Recuperación (Cu) = $-0,0401(\text{minutos})^2 + 3,2075(\text{minutos}) + 20,654$, con un coeficiente de correlación de 0,8237 y para el zinc Recuperación (Cu) = $-0,0583(\text{minutos})^2 + 4,4374(\text{minutos}) + 8,4762$, con un coeficiente de correlación de 0,9438.

Para nuestro caso el mejor reductor es el hierro mientras que para Reyna & Rey (2009), coincide que el agente reductor de mayor influencia es el hierro, además el tamaño más fino del reductor es más eficiente, además la agitación y aumento de temperatura acelera las precipitaciones, el ácido se regenera en el proceso de precipitación.

Por otra parte, Espiritu (2018), lo ve desde el punto de vista económico que el proceso de cementación con chatarra de hierro es factible con una recuperación de 75% y por el precio del mercado de cobre favorece.

Para, Amaya & Saucedo (2016), considera que el efecto de la temperatura y la velocidad de agitación influyen directamente en la extracción del cobre con ácido sulfúrico para un nivel de confianza del 95%.

Mientras que Lovera, y otros (2012) , en el proceso de cementación influye el tiempo, temperatura y la velocidad de agitación. Del mismo modo para Bustamante, y otros (2009) en la cementación el incrementa de la cinética está en función de la agitación y la temperatura.

5.2. Conclusiones.

En este trabajo realizado sobre evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental, se llegó a las siguientes conclusiones:

El metal reductor más eficiente es el hierro frente a zinc y aluminio con un 96,96% de recuperación frente a 91,86% y 86,50% respectivamente.

El efecto de precipitación en los primeros minutos de mayor efecto es el aluminio, seguido por el zinc y luego el hierro, a medida que pasa el tiempo está en orden de zinc, aluminio y hierro, pero luego cambian siendo hierro, zinc y aluminio.

El efecto de la precipitación en las aceleraciones se debe que el aluminio es metal menos estable a comparación con el zinc y el hierro, pero esto cambia cuando el metal se oxida en las paredes y es protegida del flujo de electrones para su interacción de oxidación de reducción de igual manera ocurre con el zinc mientras que con el hierro no primero pasa a hierro 2 posteriormente pasaría a hierro 3 para ello tendría que cambiar condiciones.

La electronegatividad de los elementos juega un factor importante en este caso es más estable sería el hierro por tener mayor electronegatividad, frente al zinc y esto frente al aluminio de menor electronegatividad que se puede ver en el resultado de las pruebas experimentales.

El 50% de extracción es el un punto de corte de la extracción del cobre esta se tiene para el zinc en 7,844 minutos, mientras que para el aluminio es de 4,402 minutos y hierro de 12,482 minutos.

5.3. Recomendaciones.

En función de los resultados de la parte experimental, sobre evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental, se recomienda los siguientes:

Realizar un estudio más detallado sobre la superficie de del metal reductor que ocurre después de los primeros 10 minutos respecto al aluminio y zinc si tiene menor electronegatividad son los que deben de ser mayor la extracción y en menor tiempo.

Buscar otros reductores de cobre que sean menos contaminantes con el medio ambiente, ya que al producirse los la solución pobre cargado de los elementos reductores esto afecta al ecosistema.

CAPÍTULO VI FUENTES DE INFORMACION

6.1. Fuentes Bibliográficas.

- Amaya, D., & Saucedo, J. (2016). influencia de la velocidad de agitación, concentración de ácido sulfúrico y temperatura sobre la extracción de cobre, por lixiviación de cemento de cobre; para la obtención de sulfato de cobre pentahidratado (CUSO₄.5H₂O). *Titulo profesional*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo. Obtenido de <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3144/AMAYA%20TRUJILLO%20DEIBI%20GUILLERMO%20SAUCEDO%20LLIQUE%20JURY%20MARISEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ballestes, A., Verdeja, L., & Sancho, J. (2000). *Metalurgia extractiva* (Vol. I). Madrid: Sintesis.
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación*. Chía: Pearson.
- Bustamante, A., Lovera, D., Quiñones, J., Arias, V., Puente, L., Terrel, M., . . . Sánchez, J. (30 de 09 de 2009). *Comportamiento de los iones metálicos lixiviados en la cementación del cobre*. Obtenido de Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG: http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/geologia/v12_n24/pdf/a02v12n24.pdf
- Canahua, A. (2014). *Lixiviación de Cobre*. Tacna: UNJBG.
- Carrasco, S. (2005). *Metodología de la investigación científica*. Lima: San marcos.
- Courtney, A. (2019). *Mineral processing and extractive metallurgy handbook*. Colorado: Society for mining.
- Demirkiran, N., & Kunkul, A. (2011). Recovering of copper with metallic aluminum . *ScienceDirect*, 2780.
- Demirkiran, N., Ekmekyapar, A., Künkül, A., & Baysar, A. (2007). A kinetic study of copper cementation with zinc in aqueous solutions. *ScienceDirect*, 82.

- Domic, M., & Esteban, M. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago: Andros impresores Ltda.
- Doyle, R., & Woods, R. (2000). *Electrochemistry in Mineral and Metal Processing*. New Jersey: The electrochemical society inc.
- Espiritu, M. (2018). Obtención del cemento de cobre mediante la descomposición de chatarra de hierro para la recuperación de cobre en volcán compañía minera, unidad Paragsha - pasco - 2018. *Titulo profesional*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco. Obtenido de <http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/750/1/TESIS.pdf>
- Fernandez, C. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico D.F: Mc Gram Hill .
- Gillespie, R. (1990). *Química*. Barcelona: Editorial Reverte S.A.
- Havlik. (2008). *Introduccion a Lixiviacion en Situ*.
- Karavasteva, M. (2005). Kinetics and deposit morphology of copper cementation onto zinc, iron and aluminium. *Hydrometallurgy*, 149.
- Keyes, H. (1966). *Copper Recovery Process*.
- Kotyk, A., & Slavik, J. (1989). *Intracellular pH and its Measurement*. Florida: CRC press inc.
- Krivsky. (1966). *Revised Copper and Process therefor*.
- Kumar, C. (2003). *Chemical Metallurgy: Principles and Practice*. Mumbai: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Lazo, A. (2011). Estudio de la cementación de molibdeno sobre cinc en soluciones acuosas de hidróxido de amonio. *Grado de doctor*. Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-lazo_aa/pdfAmont/cf-lazo_aa.pdf
- Lovera. (2005). *Caracterizacion Fisicoquimica y pruebas Metalurgicas en la Prospeccion de minerales Polimetálicos en el Complejo Marañon*.

- Lovera, D., Arias, V., Quiñones, J., Puente, L., Landauro, C., Pillaca, M., & Medina, J. (2012). *Cinética de la reacción de cementación de cobre a partir de minerales sulfurados del complejo Marañon*. Obtenido de Sistema de bibliotecas y biblioteca central: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v13_n26/pdf2/a07v13n26.pdf
- Mantell, C. (2003). *Ingeniería electroquímica*. Barcelona: Editorial Reverete S.A.
- Millar, C. (1997). *Lixiviación en Montones*.
- Molera, P. (1990). *Metales resistentes a la corrosión*. Barcelona: Marcombo S.A.
- Molina, E. (1971). *Cementation Process. Patent*.
- Parker, W. (1966). *Up-Grading Cement Copper*.
- Perez, J. (2008). *Análisis Termodinámico de Especies Cianuradas de Oro, Plata y Cobre sometidos a cementación*.
- Puente, L. (2002). *Precipitación Química y Absorción en el Tratamiento de Efluentes conteniendo metales disueltos*.
- Reyna, I., & Rey, J. (2009). Estudio cinético en la cementación del cobre utilizando metales de electro potenciales altos. *Titulo*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2217/Reina%20Orosco%20-%20Rey%20Delgadillo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas, F. (2019). Diseño y cálculo de un sistema motriz para un reactor rotativo para la cementación de cobre, en conjunto de una valorización del sistema. *Titulo profesional*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso. Obtenido de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46582/3560900260860UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rumbu, R. (2018). *Review on Copper Hydrometallurgy*. Ciudad del cabo. Obtenido de <https://www.amazon.com/Review-Copper-Hydrometallurgy-Roasting-Leaching-Solvent-Extraction-Electrowinning-ebook/dp/B07M82H1KQ>

Shamsuddin, M. (2016). *Physical chemistry of metallurgical processes*. Canada: Wiley.

Stefanowicz, T., & Osifiska, N. Z. (1996). Copper recovery by the cementation method. *Hydrometallurgy*, 70.

Teijón, J., Garcia, J., Jimenez, Y., & Guerrero, I. (2006). *La Química en problemas*. Madrid: Editorial Tebar S.L.

ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia general

Titulo	Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Indicadores
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">“ EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE SOLUCIONES LIXIVIADAS MEDIANTE REDUCTORES METÁLICOS PARA LA PRECIPITACIÓN DE COBRE A NIVEL EXPERIMENTAL”</p>	<p>Generales</p>	<p>General</p>	<p>General</p>	<p>Independiente</p>	
	<p>- ¿De qué manera será posible realizar la evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental?</p>	<p>- Evaluar el tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, para la precipitación de cobre a nivel experimental.</p>	<p>- Realizando una evaluación adecuada del tratamiento de soluciones lixiviadas mediante reductores metálicos, se podrá obtener una óptima precipitación de cobre a nivel experimental.</p>	<p>Evaluación del tratamiento de soluciones lixiviadas</p>	<p>- Tiempo - Reductor metálico Fe, Zn, Al</p>
		<p>Específicos</p>	<p>Específicos</p>	<p>Dependiente</p>	
<p>- Empleando el tiempo necesario en el proceso de precipitación con el reductor metálico a la solución lixiviada, se obtendrá un cemento de cobre con una ley óptima que satisfaga las perspectivas deseadas.</p>	<p>- Evaluar el tiempo necesario en el proceso de precipitación con el reductor metálico en la solución lixiviada, para obtener un cemento de cobre con una ley optima que satisfaga las perspectivas deseadas.</p>	<p>- Empleando el tiempo necesario en el proceso de precipitación con el reductor metálico a la solución lixiviada, se obtendrá un cemento de cobre con una ley óptima que satisfaga las perspectivas deseadas.</p>	<p>Precipitación de cobre</p>	<p>- ley</p>	
<p>- Empleando el reductor metálico de hierro, zinc y aluminio a la solución lixiviada, con cuál de ellos tendrá un cemento de cobre óptimo que satisfaga las perspectivas deseadas respecto a su ley y recuperación.</p>	<p>- Evaluar el empleo del reductor metálico de hierro, zinc y aluminio en la solución lixiviada, para predecir con cuál de ellos se tendrá un cemento de cobre óptimo que satisfaga las perspectivas deseadas respecto a su ley y <u>recuperación.</u></p>	<p>- Con el empleo del reductor metálico de hierro, zinc y aluminio a la solución lixiviada, se obtendrá un cemento de cobre óptimo que satisfaga las perspectivas deseadas respecto a su ley y recuperación.</p>		<p>- Recuperación</p>	

Anexo 2 Datos recopilados de cementación con hierro

N	t (min)	Muestra (ml)	V Gastado (ml) por titulación	V restante (cm3)	%Cu	Masa (g.) Cu	Concentración (g/L)Cu	Concentración (g/L)Cu por Fotometro	Cu (g.) Restante en solución	% Restante en Solución
1	0	1	6,67	500	1,4016	0,01446	14,4578	-	-	-
2	5	1	5,9	495	1,2404	0,01280	12,7952	-	-	-
3	10	1	3,8	490	0,7989	0,00824	8,2410	-	-	-
4	15	1	2,5	485	0,5256	0,00542	-	-	-	-
5	20	1	1,3	480	0,2733	-	-	-	-	-
6	25	0,1	-	475	-	-	-	-	-	-
7	30	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
8	35	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
9	40	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
10	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

N	t (min)	Muestra (ml)	V Gastado (ml) por titulación	V restante (cm3)	%Cu	Masa (g.) Cu	Concentración (g/L)Cu	Concentración (g/L)Cu por Fotometro	Cu (g.) Restante en solución	% Restante en Solución
1	0	1	6,67	500	1,4016	0,01446	14,4578	-	7,2289	-
2	5	1	6,2	495	1,3035	0,01345	13,4458	-	-	-
3	10	1	5,3	490	1,1143	0,01149	11,4940	-	-	-
4	15	1	2,9	485	0,6097	0,00629	6,289	-	-	-
5	20	1	1,5	480	0,3154	0,00325	-	-	-	-
6	25	1	0,8	475	0,1682	-	-	-	-	-
7	30	0,1	-	470	-	-	-	-	-	-
8	35	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
9	40	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
10	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo 3 Datos recopilados de cementación con zinc

N	t (min)	Muestra (ml)	V Gastado (ml) por titulación	V restante (cm ³)	Peso g Solución	%Cu	%Cu	g(Cu)	Masa (g.) Cu	Concentración (g/L)Cu	g/L(Cu)	Cu (g.) Restante en solución	g(Cu) solución	%Restante en Solución
1	0	1	6,57	500	1,032	1,381	1,381	0,0142	0,0142	14,246	14,2462	7,1241	7,1241	100,00
2	5	1	5,10	495	1,032	1,072	1,072	0,0111	0,0111	11,060	11,0602	5,4748	5,5301	76,85
3	10	1	2,70	490	1,032	0,568	0,568	0,0059	0,0059	5,855	5,8554	2,8692	2,9277	40,27
4	15	1	1,90	485	1,032	0,399	0,399	0,0041	0,0041	4,120	4,1205	1,9984	2,0603	28,05
5	20	1	1,40	480	1,032	0,294	0,294	0,0030	0,0030	3,036	3,0361	1,4573	1,5181	20,46
6	25	1	1,30	475	1,032	0,273	0,273	0,0028	0,0028	2,819	2,8192	1,3392	1,4096	18,80
7	30	1	1,20	470	1,032	0,252	0,252	0,0026	0,0026	2,602	2,6024	1,2231	1,3012	17,17
8	35	1	1,10	465	1,032	0,231	0,231	0,0024	0,0024	2,384	2,3855	1,1093	1,1928	15,57
9	40	1	1,00	460	1,032	0,210	0,210	0,0022	0,0022	2,169	2,1687	0,9976	1,0843	14,00
10	45	1	0,62	455	1,032	0,130	0,130	0,0013	0,0013	1,345	1,3446	0,6118	0,6723	8,59
11	50	1	0,62	450	1,032	0,130	0,130	0,0013	0,0013	1,345	1,3446	0,6051	0,6723	8,49

Muestra (ml)	V Gastado (ml) por titulación	V restante (cm3)	%Cu	Masa (g.) Cu	Concentración (g/L)Cu	Cu (g.) Restante en solución	% Restante en Solución	%Recuperación	Cu g Solución	%Cu Solución
1	6,470	500,00	1,360	0,014	14,031	7,016	100,000	0,000	7,0157	100,00
1	4,600	495,00	0,967	0,010	9,976	4,938	70,386	29,614	4,9880	71,10
1	2,700	490,00	0,568	0,006	5,855	2,869	40,896	59,104	2,9277	41,73
1	2,200	485,00	0,463	0,005	4,771	2,314	32,983	67,017	2,3855	34,00
1	1,600	480,00	0,336	0,003	3,470	1,666	23,740	76,260	1,7349	24,73
1	1,300	475,00	0,273	0,003	2,819	1,339	19,088	80,912	1,4096	20,09
1	1,100	470,00	0,231	0,002	2,386	1,121	15,981	84,019	1,1928	17,00
1	1,000	465,00	0,210	0,002	2,169	1,008	14,374	85,626	1,0843	15,46
1	0,900	460,00	0,189	0,002	1,952	0,898	12,798	87,202	0,9759	13,91
1	0,580	455,00	0,122	0,001	1,258	0,572	8,158	91,842	0,6289	8,96
1	0,560	450,00	0,118	0,001	1,214	0,547	7,790	92,210	0,6072	8,66

Anexo 4 Datos recopilados de cementación con aluminio

N	t (min)	Muestra (mL)	V Gastado (mL) por titulación	V restante (cm ³)	%Cu	Masa (g) Cu	Concentración (g/L)Cu	Cu (g.) Restante en solución	% Restante en Solución	Recup
1	0	1	6,67	500	1,4016	7,229	14,458	7,229		
2	5	1	3,10	495	0,6518	3,328	6,723			
3	10	1	2,80	490	0,5887	2,975	6,0			
4	15	1	2,40	485	0,5046	2,524				
5	20	1	2,30	480	0,483					
6	25	1	2,20	475						
7	30	1	2,00							
8	35	1								
9	40									
10										

N	t (min)	Muestra (ml)	V Gastado (ml) por titulación	V restante (cm ³)	%Cu	Masa (g) Cu	Concentración (g/L)Cu	Cu (g) Restante en solución	% Restante en Solución Cu	% Recuperación Cu
1	0	1	6,67	500	1,4016	7,229	14,458	7,2289	100,00	0,00
2	5	1	3,00	495	0,6307	3,220	6,506	3,2530	45,00	55,00
3	10	1	2,70	490	0,5677	2,869	5,855	2,9277	40,50	59,50
4	15	1	2,20	485	0,4625	2,314	4,771	2,3855	33,00	67,00
5	20	1	2,10	480	0,4415	2,186	4,554	2,2771	31,50	68,50
6	25	1	2,00	475	0,4205	2,060	4,337	2,1687	30,00	70,00
7	30	1	1,20	470	0,2523	1,223	2,602	1,3012	18,00	82,00
8	35	1	1,10	465	0,2313	1,109	2,386	1,1928	16,50	83,50
9	40	1	1,00	460	0,2102	0,998	2,169	1,0843	15,00	85,00
10	45	1	0,90	455	0,1892	0,888	1,952	0,9759	13,50	86,50
11	50	1	0,80	450	0,1682	0,781	1,735	0,8675	12,00	88,00