

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**LIXIVIACIÓN DE CONCENTRADOS DE COBRE
EN AUTOCLAVE**

TESIS

Presentada por:

Bach. Kennedy Mamani Coaquira

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA
TACNA – PERÚ**

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**LIXIVIACIÓN DE CONCENTRADOS DE COBRE
EN AUTOCLAVE**

Tesis sustentada y aprobada el día 22 de diciembre de 2017, estando integrado el Jurado Calificador por:


PRESIDENTE


:
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO


:
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

VOCAL


:
Ing. Julián Nieto Quispe

ASESOR


:
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantes

DEDICATORIA

Gracias a dios por darme un sentido a mi vida.

Con cariño y mucho amor para mi papá Aurelio Mamani F. y mi madre Justina Coaquira C. Que se encuentra en el paraíso a mis Dedicado hermanos, Santos H. Mamani C., Edwin Mamani C., Clac M. Mamani C., Elliot, B. Mamani C., Jeampier B Mamani C., Por haberme inculcado los valores en mi formación como persona y por brindarme todo su apoyo y comprensión. A Laura S. Supo A. por el apoyo incondicional en mi vida. “Mamá, gracias por el inmenso amor que me diste y sé que desde el cielo guías mis pasos...”

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, debo manifestar mi eterna gratitud a mis hermanos, por haber influido en todo momento de mí desarrollo académico. Ellos me mostraron el mundo de las ciencias exactas y son los responsables últimos de que pudiera realizar mis estudios.

Mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo, entregándome conocimientos, apoyo o simplemente cariño y comprensión.

A mis padres por darme la vida, una maravillosa formación, por su ternura y todo su amor, y por contagiarme de sus fortalezas, y esas fuerzas para seguir adelante y no flaquear, y hoy que está en el cielo mi madre sé que me sigues ayudando en todo.

A mi casa de estudios Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, en especial a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por su contribución en mi formación profesional.

A mi asesor el Ing. Zoilo Valdivia Infantas, por su apoyo incondicional en el desarrollo del presente trabajo de tesis.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	4
1.1.1. Antecedentes del problema	4
1.1.2. Problemática de la investigación	5
1.2. Formulación del problema	6
1.4. Alcances y limitaciones	7
1.5. Objetivos	9
1.5.1. Objetivo general	9
1.5.2. Objetivo específico	9
1.6. Hipótesis	10
1.6.1. Hipótesis general	10
1.6.2. Hipótesis específica	10

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	11
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	11
2.1.1. Desarrollo de la hidrometalurgia del cobre	11
2.1.2. Autoclaves	21
2.1.3. Tecnologías existentes	23
2.2. Bases teóricas	31
2.2.1. Físico química de la lixiviación de los sulfuros en autoclave referencia.	31
2.2.3. Lixiviación por agitación a presión	34
2.3. Definición de términos	35
2.3.1. Autoclave	35
2.3.2. Lixiviación de concentrados	35
2.3.3. Presión parcial de oxígeno	35
2.3.4. Tiempo de retención	36
2.3.5. Tamaño de partícula	36
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	37
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	37
3.1.1. Investigación experimental explorativo	37
3.1.2. Diseño de la investigación exploratorio	38
3.2. Población y muestra	39

3.3.	Operacionalización de variables	40
3.3.1.	Variables independientes	40
3.3.2.	Variables dependientes	40
3.4.	Técnicas de instrumentos y para la recolección de datos	41
3.5.	Procesamiento y análisis de datos	42
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		43
4.1.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA AUTOCLAVE	43
4.2.	Resultados	46
4.2.1.	Desarrollo de pruebas en Laboratorio	46
4.2.2.	Resultado de las pruebas en autoclave	51
4.2.2.1.	Parámetros de operación	51
4.2.2.2.	Alimentación y cosecha	52
4.2.2.3.	Resultados de las pruebas	53
4.2.3.	Procedimiento de las pruebas	56
4.2.4.	Discusión	59
CONCLUSIONES		61
RECOMENDACIONES		63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Procesos de sulfatación de cobre de operaciones en producción.	27
Tabla 2.	Desarrollos recientes de operaciones en producción.	30
Tabla 3.	Operacionalización de variables.	42
Tabla 4.	Operacionalización de variables de autoclave.	44
Tabla 5.	Composición química del concentrado de Toquepala.	48
Tabla 6.	Parámetros operativos.	51
Tabla 7.	Parámetros de operación del proceso de lixiviación en autoclave	52
Tabla 8.	Alimentación y cosecha.	53
Tabla 9.	Resultado de pruebas de lixiviación de concentrado.	54
Tabla 10.	Pruebas de extracción y concentración.	55
Tabla 11.	Análisis de ripio del concentrado.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de oxidación chalcopirita autoclave	33
Figura 2. Plano de autoclave construida	46
Figura 3. Autoclave construida	50
Figura 4. Línea tendencia	55
Figura 5. Correlación	56

RESUMEN

El presente estudio comprende en primer lugar la construcción de una autoclave de una capacidad de cuatro litros, que ha permitido realizar pruebas sobre las variables operativas del proceso de lixiviación de concentrados sulfurados de cobre para obtener una cosecha de sulfato de cobre de alta concentración, que se pueda utilizar en la producción de cátodos de cobre mediante la electrodeposición. Se ha considerado la conveniencia de iniciar la investigación de este proceso de lixiviación de concentrados de cobre en autoclave debido a que el Perú es el segundo país productor de cobre en el mundo después de Chile, así como en capacidad de reservas de minerales primarios de cobre, el tercero es EEUU y juntos los tres países poseen el 70 % de las reservas mundiales. Empresas extranjeras y empresas que están en operaciones en el Perú se han caracterizado por utilizar la tecnología más avanzada en sus operaciones. Esto significa que como consecuencia de que en algún momento se agotarán los óxidos de cobre y se tendrá que utilizar los concentrados de sulfuros de cobre para abastecer de solución de sulfato de cobre a las plantas hidrometalurgias existentes tendrán que recurrir a esta tecnología que se encuentra en sus comienzos de desarrollo.

Palabras clave: Lixiviación de concentrados, cobre, autoclave, óxido.

INTRODUCCIÓN

Los procesos hidrometalúrgicos juegan un rol importante en la metalurgia extractiva de minerales de baja ley, conforme a la ley en los metales raros y últimamente lo están haciendo en los concentrados de cobre. Hay muchas razones para este reciente interés por los procesos hidrometalúrgicos, tales como: Están libres de contaminación, especialmente contaminación del aire. Permiten el tratamiento de minerales de baja ley o materiales de desechos de minas que no puedan económicamente ser tratados por molienda, fundición y refinación convencional. Los procesos hidrometalúrgicos son más baratos en costos de capital que las fundiciones y las operaciones hidrometalúrgicas son más fáciles de controlar.

Un proceso hidrometalúrgico puede ser dividido generalmente en tres operaciones unitarias principales: lixiviación del metal deseado en la solución, concentración y purificación de la solución impregnada y finalmente la recuperación del metal. El proceso de lixiviación comprende la disolución del valor metálico de una mena en una solución acuosa con agentes químicos apropiados en un espacio limitado.

La fuente principal de las materias primas son; los minerales que ocurren naturalmente. Estos minerales pueden ser nativos, minerales oxidados o minerales sulfurados.

La selección de un reactivo de lixiviación, depende de su disponibilidad, costo, estabilidad, selectividad, facilidad de producción y regeneración y la facilidad de recuperación del valor metálico del reactivo de lixiviación. La lixiviación con ácido sulfúrico es la más ampliamente usada en la industria del cobre. La lixiviación alcalina es más selectiva, menos corrosiva, ocasiona un menor consumo de reactivos para gangas.

El aire y el oxígeno son los agentes oxidantes más empleados y los más económicos y en los procesos de lixiviación de sulfuros secundarios de cobre como la calcosina (Cu_2S) se usa bacterias como agente catalizador de la oxidación.

En la lixiviación de minerales también se usan agentes a complejantes que forman iones metálicos complejos estables con los agentes complejantes, tales como el complejo tetramin cobre (II).

Los principales métodos de lixiviación son: in-situ, botadero, pilas, bateas, agitación y a presión. La selección del método de lixiviación

depende de las características físicas y químicas mineral valioso y los minerales asociados. Los factores más importantes son: la ley del mineral, la solubilidad del valor metálico, la cinética de disolución, el consumo de reactivo, el tamaño de la operación, el tipo de minerales, etc. Las reacciones son de óxido-reducción y para favorecer el proceso, se necesita condiciones de temperatura y presión. El uso de agentes catalizadores como microorganismos es una alternativa viable.

A estos métodos tradicionales de lixiviación, se agrega ahora el gran interés por la lixiviación de los concentrados sulfurados de cobre primario, o sea por la calcopirita, como una proyección al futuro agotamiento de los minerales de cobre oxidados y sulfuros secundarios como la calcosina (Cu_2S). Estos nuevos procesos son la lixiviación en autoclave a elevadas temperaturas y presiones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes del problema

Las reservas de minerales de óxidos de cobre, están en su fase terminal, por lo cual la industria minera del cobre, ha tenido que implementar y mejorar constantemente la lixiviación de los sulfuros secundarios que hace cuarenta años no se practicaba, a pesar de esta innovación las reservas de estos sulfuros secundarios también han entrado en una etapa de agotamiento que hace necesario resolver la pregunta de si la calcopirita que es un sulfuro primario, también puede someterse a un proceso hidrometalúrgico. La respuesta es que esto es posible y es la garantía para que puedan seguir operando las plantas hidrometalúrgicas de cobre hasta que se agoten las reservas de cobre de todo tipo.

Es por ello que actualmente existen varios procesos en etapa de desarrollo que tienen como objetivo lixiviar los concentrados de cobre que básicamente están constituidos por sulfuros primarios. Uno de ellos es la

lixiviación de concentrados de cobre en autoclave que es el motivo del presente estudio. Este tipo de proceso a un no se aplica en el Perú

Para la ejecución del presente estudio fue necesario construir una autoclave, aunque con ciertas limitaciones, que permitieran realizar las pruebas básicas que lo permitan concluir que los concentrados de cobre tomando como referencia de la empresa Southern Perú, responden a este tipo de proceso de lixiviación en autoclave para obtener una cosecha de solución de cobre de alta concentración, que se pueda utilizar en la producción de cátodos de cobre mediante la electro obtención.

1.1.2. Problemática de la investigación

Los procesos tradicionales de lixiviación del cobre, no servirán para afrontar las necesidades futuras de producción de cobre, ante la cercanía del agotamiento de los minerales fácilmente lixiviables, como los óxidos de cobre y el sulfuro secundario calcosita, debiendo investigarse la lixiviación en autoclave de los concentrados de sulfuros primarios como la calcopirita, como una de las pocas alternativas para afrontar el abastecimiento futuro de cobre, como ya lo está haciendo la Planta Kansanshi instalada en Zambia en África.(Valdivia, 2009)

1.2. Formulación del problema

¿Cómo se logrará la lixiviación de sulfuros primarios de cobre en una autoclave de fabricación local?

1.3. Justificación e importancia

Se debe investigar esta tecnología naciente porque en dos décadas habrá escases de minerales lixiviables como los óxidos de cobre y la calcocita, teniendo que recurrirse a lixiviar los concentrados sulfurados de cobre como la calcopirita, cuyas mejores posibilidades será hacerlo en autoclave a alta presión y temperatura.

Los primeros resultados obtenidos de la investigación sobre lixiviación de concentrados de cobre en autoclave, permitirán elaborar un programa de mayor amplitud para conocer y controlar las diversas variables del proceso.

Con las pruebas se podrá ir mejorando el conocimiento del proceso y pasar a una etapa de pilotaje, que permitan en algún momento interesar a la industria metalúrgica del país por ser una tecnología que permite mejorar los costos de producción de cobre electrolítico.

Este tipo de tecnología es amigable al medio ambiente, porque elimina la emisión de SO_2 a la atmosfera y trabaja en circuito cerrado produciendo ácido sulfúrico para el propio proceso.

1.4. Alcances y limitaciones

La Investigación se desarrolló en la UNJBG, en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann – Tacna.

El mayor periodo de tiempo de este estudio fue insumido por la puesta a punto de la autoclave, principalmente respecto a la hermeticidad y dentro de esto al sellado de los prensaestopas, del eje de agitación.

La limitación fundamental fue la falta de un equipo de molienda ultra fina, que permitiera obtener una granulometría P_{80} de 10 a 30 micras, que es el rango de granulometría óptima para este tipo de tecnología.

El concentrado de la operación minera Toquepala, tiene una granulometría P_{80} de 80 micras, tamaño muy por encima del óptimo requerido por este proceso. Ante la necesidad de iniciar las

investigaciones sobre la lixiviación de los concentrados de sulfuros primarios de cobre, se tomó como muestra el concentrado de Toquepala.

La operación que se está llevando a cabo en la Planta Kansanshi, como la única a nivel mundial, realiza la lixiviación en autoclave a temperaturas de 523,15 K (250 °C) 1 723,70 kPa de presión, pero con la finalidad de reducir el problema de la extracción de hierro, están realizando investigaciones a temperaturas de 423,15 K (150 °C) y 1 034,22 kPa de presión, por parte del presente estudio se tubo trazado el objetivo de realizar pruebas a 363,15 K (90 °C) y 1 034,22 kPa de presión para no tener mucha presencia de hierro en la solución cosecha e interferir en los análisis de concentración con el colorímetro y para asegurar una operación menos riesgosa y con posibilidades de éxito con la autoclave. Se dejará las pruebas a mayores temperaturas para otros estudios, con un mayor apoyo sobre todo cuando la ESME, cuente con un equipo de molienda ultra fina y con la adquisición de una autoclave de marca de una capacidad de uno o dos litros por su menor costo. Las pruebas realizadas se realizaron en la autoclave fabricada por el tesista, de una capacidad de cuatro litros.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

A partir de un concentrado de cobre, obtener una solución de sulfato de cobre con una concentración mayor a 30 gramos por litro de cobre, empleando el proceso de lixiviación de concentrado en una autoclave, solución de sulfato de cobre que servirá para una siguiente etapa de aplicaciones en la electrometalurgia de la tecnología de electrodeposición directa de la solución cosecha producida en autoclave.

1.5.2. Objetivo específico

- Evaluar las variables del proceso de la lixiviación en autoclave, para determinar la recuperación de sulfato de cobre del concentrado. Construyendo una autoclave con los recursos de la ESME que permita realizar las pruebas de lixiviación de concentrado de cobre y obtener resultados específicos con el manejo de las variables del proceso.
- Establecer si el nivel de recuperación del sulfato de cobre, obtenido es aceptable permitiendo justificar la contribución de la investigación.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La construcción de una autoclave con los recursos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalurgia que permitirá realizar las pruebas de lixiviación de los concentrados sulfurados de cobre, lográndose obtener una cosecha de alta concentración de sulfato de cobre.

1.6.2. Hipótesis específica

- Realizar las pruebas de lixiviación de concentrados de cobre de la Mina Toquepala fijando adecuadamente las variables independientes se obtendrá una solución de sulfato de cobre con concentración aproximada al 30 %.
- Es factible construir una autoclave a partir de una celda de flotación dada de baja.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

2.1.1. Desarrollo de la hidrometalurgia del cobre

Antes de la década de los sesenta, la empresa Cerro de Pasco Corporation (posteriormente estabilizada como la empresa Centromin Perú) casi monopolizaba el sector minero-cuprífero en Perú. A partir de 1960, Southern Perú Copper Corporation dio inicio a las grandes inversiones en el sur del Perú con la mina -Toquepala. A partir de 1976, la producción de cobre vuelve a tener un salto debido al inicio de las operaciones de la mina - Cuajone. A mediados de este periodo se incorporan a la producción otros yacimientos importantes, como Tintaya y Cerro Verde. (Valdivia, 2009)

Southern Perú Copper Corporation actualmente es el mayor productor de cobre en el país, representando más del 60 por ciento de la producción. Esta empresa incluye dos minas de tajo abierto, dos

concentradoras, una fundición y refinería y una planta de extracción por solvente y electrodeposición. La empresa realiza los primeros estudios de exploración en los años cincuenta e inició sus actividades en 1960, con la explotación de la mina a tajo abierto de Toquepala. A lo largo de sus cuarenta años, Southern Perú ha explotado no solo el yacimiento de Toquepala, sino también el yacimiento de Cuajone. (Valdivia, 2009)

La mina de Toquepala, se ubica en el distrito de Ilabaya, y explota el mineral de cobre bajo el método de tajo abierto. De esta mina también se extrae concentrado de molibdeno, aunque en menor cantidad. La mina de Toquepala es un importante pilar de la economía departamental y nacional, dado que produce 250 000 toneladas de cobre fino por la vía pirometalúrgica e hidrometalurgia. (Valdivia, 2009)

En junio de 1996 se inauguró en Toquepala una planta de lixiviación, extracción por solvente y electrodeposición, que permite recuperar cobre de los materiales de baja ley acumulados en los botaderos desde el inicio de la operación en la zona próxima a la mina Toquepala con lo que se produjo un incremento de la producción nacional de cobre en 9 por ciento. (Valdivia, 2009)

El proceso de lixiviación de minerales de cobre, se ha realizado desde muy antiguo, utilizando diversos procedimientos para su implementación práctica. En el siglo XX, se han usado técnicas de lixiviación por agitación para altas leyes de cobre, aprovechando las técnicas industriales de molienda desarrolladas para el proceso de flotación. (Valdivia, 2009)

De forma análoga, durante la primera mitad de este siglo, y para leyes más bajas que no justificaba su molienda, se optó por el uso de grandes bateas de concreto revestido con bitumen, dotadas de un fondo filtrante, donde se cargaba el mineral chancado y se inundaba con las soluciones ácidas. Es el proceso que usaron grandes operaciones mineras como Chuquicamata y Mantos Blancos, en el cobre. Con el desarrollo industrial masivo de los plásticos, en láminas y en tuberías, se pudo eliminar las paredes contenedoras de dichas bateas y surgieron los primeros intentos de hacer lixiviación en pilas. (Valdivia, 2009)

El gran desafío que se presentó para la lixiviación en pilas, desde sus inicios, fue mantener una buena permeabilidad en el lecho del mineral cargado en las pilas. Esto en un comienzo limitaba el tamaño de la alimentación a una granulometría de dos pulgadas, lo que, a su vez,

derivaba en bajos rendimientos de recuperaciones y gran porcentaje de canalizaciones para las soluciones percolantes. El proceso se mantuvo con una aplicación limitada a minerales marginales de muy baja ley, principalmente en los EEUU, durante los años 1950 – 1970, y a tan sólo unas pocas operaciones de leyes más moderadas, siendo la más relevante la de Cerro Verde, en Perú, que se inició en 1974, con limitados rendimientos del orden de 30 % en el año y 1960 a 1970 mejoró, con una granulometría de dos pulgadas y que posteriormente se disminuyó a 8,64 centímetros (3/4 pulgadas) (Tapia, 2007)

Lo que hace particularmente atractivo aplicar el proceso de lixiviación en pilas en la minería del cobre, es la posibilidad de ligar el proceso a las etapas posteriores de purificación de soluciones, mediante extracción por solventes, seguida de la recuperación electrolítica del cobre disuelto, proceso conocido como electrodeposición o electrowinning. Esta combinación de procesos hidrometalúrgicos permite la obtención de cobre electrolítico, en forma de cátodos, a temperatura ambiente y por medios solamente líquidos con una calidad de 99,999 % de cobre, evitando los inconvenientes energéticos y ambientales que provoca el proceso alternativo de concentración y fundición de los concentrados. (Tapia, 2007)

En 1975, se concedió a Holmes and Narver, de EEUU, la patente del sistema denominado de “lixiviación TL” (thin layer igual a capas delgadas), que proponía realizar un chancado fino (típicamente menor a 1,27 centímetros) y, antes de formar las pilas, acondicionar el mineral empapándolo con ácido sulfúrico con una alta concentración y agua, de manera de formar las pilas con el ácido ya incorporado, operación denominada curado del mineral. Este tipo de proceso solamente se aplicó para minerales de cobre oxidado, con cobre superficial a la vista para reaccionar directamente con el ácido. Pero, la gran limitante estaba en que las pilas de mineral no podían exceder de un metro de altura (de ahí el nombre de capas delgadas, para evitar la impermeabilización del lecho producto de los finos que proceden del chancado. Este método no alcanzó a ser implementado industrialmente. (Dreisinger, 2006)

Sin embargo, un complemento exitoso se produjo en la Sociedad Minera Pudahuel, Chile, cuando, entre 1976 a 1978, se desarrollaron y perfeccionaron la aglomeración durante el agregado de ácido previo a la lixiviación y se logró la formación de un “aglomerado”, de características físicas suficientemente firmes como para mantenerse estables durante el carguío de las pilas y en su posterior regado por aspersion. Esto se logró

regulando de una manera exacta y limitada las dosis de agua y de ácido, a la vez que se hacía rotar el mineral sobre sí mismo. De esta manera, los líquidos se distribuyen uniformemente por toda la superficie de las partículas sólidas, las que se unen entre sí formando firmes “puentes líquidos”, establecidos mediante la acción de fuerzas de capilaridad de Van der Waals, mecanismo físico ampliamente conocido, pero inédito en estas aplicaciones. (Dreisinger, 2006)

Una vez patentado este cambio fundamental, en 1981, la Sociedad, Minera Pudahuel y Holmes and Narver establecieron un convenio de comercialización conjunta del proceso, que mantuvo su nombre original de TL, pero no existiendo ya límite para la altura de la pila, lo importante solo era que la capa de líquido inter-partículas fuese siempre lo más delgada posible, de allí la necesidad de controlar la adición de líquidos en la aglomeración y de no inundar el lecho de mineral en ningún momento, lo cual se logró optimizar con la aplicación del riego por goteo. (Dreisinger, 2006)

Con esta técnica de lixiviación no era necesario que el cobre estuviese en la superficie de las partículas, sino que también sería aplicable a minerales altamente diseminados y, particularmente, también

a los minerales de cobre sulfurado de tipo secundario como la calcosita, ya que la porosidad de la nueva estructura del lecho lo hacía ideal para incentivar el desarrollo bacteriano aunque fuera largo plazo, ya que lo único que interesa en ese caso es la obtención y mantenimiento de una buena permeabilidad líquida y gaseosa durante todo el transcurso de la lixiviación. (Dreisinger, 2006)

La primera implementación industrial de este nuevo proceso se produjo exitosamente en la Sociedad Minera Pudahuel, inaugurada en diciembre de 1980. Sin embargo, debido al bajo precio del cobre y a la situación política del país imperante en la década de los 80, el proceso no fue nuevamente implementado industrialmente sino hasta el inicio de los años 1990. No obstante, Pudahuel aprovechó en difundir su aplicación a numerosos proyectos, tanto de minerales oxidados como de sulfuros secundarios como la calcosita, que pudieron así con posterioridad, implementarse industrialmente con gran rapidez, una vez que las condiciones de mercado hicieron más favorable su puesta en marcha. (Tapia, 2007)

El gran impulso que condujo a la popularidad actual del proceso se produjo con la subida del precio del cobre desde 1990 en adelante, que coincidieron con la iniciativa pública de diversos proyectos de cobre sobre

todo en Chile y otros lugares del mundo, que aprovecharon los estudios efectuados por Pudahuel en la década precedente. (Tapia, 2007)

La lixiviación en pilas se emplea en todo el Perú para la producción de metales preciosos y cobre. La lixiviación de metales preciosos se da principalmente en la parte centro del norte del Perú. Mientras que la lixiviación de cobre se da principalmente en la parte del sur del país. Las instalaciones de lixiviación se encuentran ubicadas en diversos entornos climáticos y físicos y se emplean técnicas de construcción de pilas tanto permanentes como dinámicas. (Tapia, 2007)

Los avances tecnológicos peruanos en lixiviación en pilas se han concentrado en la extracción metalúrgica de cobre y oro. Las pruebas en pilas que evalúan tamaño de grano, ciclo de lixiviación y la concentración de lixiviantes, son comunes. Las técnicas de lixiviación en pilas brindan hoy en día la oportunidad de extraer diversos metales de diferentes tipos de minerales de leyes altas y bajas. Es gracias a esta etapa del desarrollo que la hidrometalurgia en Chile se desarrolla intensivamente con la lixiviación en pilas sobre todo del tipo dinámicas incorporando en el proceso el sulfuro secundario calcosita que solamente era tratada para

producir concentrados de cobre. Es así como entran en operación plantas hidrometalúrgicas como: (Tapia, 2007)

Zaldívar en 1995, capacidad 410,00 t/d, lixiviando calcosina, brocantita y crisocola con alturas de pila de 6 metros, tipo dinámica y una extracción de 77 por ciento en 460 días. (Tapia, 2007)

Mantos Blancos división Manto verde en 1996, lixiviando brocantita, crisocola, atacamita, malaquita, antlerita y cuprita, con alturas de pila de 5 metros, tipo permanente, con una altura final de 30 metros y 15 capas y una extracción de 83 por ciento en 50 días. (Tapia, 2007)

El Abra en 1996, capacidad 1 450,00 t/d, lixiviando, crisocola, malaquita y calcosita, con alturas de pila de 6 metros, tipo dinámica y una extracción de 77 por ciento en cobre total y 81 por ciento en cobre soluble en un ciclo de lixiviación de 50 días.(Tapia, 2007)

Radomiro Tomic Codelco en 1997, capacidad 900,00 t/d, lixiviando atacamita y crisocola, en pilas dinámicas, con alturas de pila de 8 metros, tipo dinámica y una extracción de 81 % en 44 días. (Tapia, 2007)

Minera Escondida en 1998, capacidad 1 270,00 t/d, lixiviando antlerita, brocantita, crisocola y cuprita, con alturas de pila de 6 m, tipo

permanente, con una altura final de 90 m y 15 capas y una extracción de 87 por ciento en 85 días. (Valdivia, 2009)

Lomas Bayas en 1998, capacidad 348,00 t/d, lixiviando antlerita, brocantita, poca crisocola, calcantita, atacamita y cuprita, con alturas de pila de 6 metros, tipo permanente, con una altura final de 72 m y una extracción de 73 por ciento en 40 días. (Valdivia, 2009)

En el año 1999, se inician las operaciones industriales de lixiviación de minerales secundarios con 80 % de calcosina en Mount Gordon, Australia, empleando autoclaves, luego en el 2005 la empresa minera Sepon en Laos Asia, también emplea autoclaves, pero todavía para lixiviar el sulfuro secundario calcosina. (Valdivia, 2009)

En el 2003 Bagdad, Arizona EEUU, inicia operaciones con el proceso de lixiviación en autoclave a alta presión y temperatura dando inicio a la lixiviación del sulfuro primario calcopirita, interrumpiendo sus operaciones en espera de un momento más adecuado. En el 2005 inicia su operación en la Planta Kansanshi, en el Solwesi, Zambia, llegando a producir 4 000,00 toneladas de cobre electrolítico al año. Dando así inicio al empleo a gran escala de la lixiviación de concentrados de cobre en

autoclave, siendo por el momento la única operación de este tipo a nivel mundial. (Valdivia, 2009)

2.1.2. Autoclaves

Los procesos que más han destacado para la lixiviación de los concentrados de cobre, utilizan como equipo fundamental la autoclave que opera a temperatura y presión alta, de igual modo la mayoría de los otros procesos en etapa de desarrollo también consideran la autoclave como el equipo principal. Por la importancia que tiene en la lixiviación de los concentrados, a continuación, trataremos sobre los principios básicos de su operación. (Marsden, 2015)

Un proceso exitoso que utilice, la autoclave para tratar los concentrados de calcopirita, debe reunir los siguientes requerimientos: (Marsden, 2015)

1. El proceso debe ser exotérmico, de modo que no necesite combustible y el calor generado debe recuperada eficientemente.
2. El agente oxidante debe ser barato y no debe necesitar regeneración, como por ejemplo el oxígeno o eventualmente el aire.

3. Los componentes de la calcopirita como el hierro y el azufre, deben obtenerse como un residuo en un número de etapas mínimo y el azufre debe estar en la forma elemental.
4. Los metales preciosos contenidos en el concentrado deben ser posibles de ser recuperados.

Es indispensable iniciar los proyectos de investigación en este proceso de lixiviación de concentrado de cobre en autoclave, ya que el Perú es el segundo país del mundo después de Chile, en reservas de minerales primarios de cobre, el tercero es EEUU, y juntos los tres países poseen el 70 % de las reservas mundiales de minerales de cobre, por lo tanto, es importante que el Perú lleve adelante un plan de investigación futurista para competir en desarrollo de tecnología con estos dos países. Se estima que dentro de veinte años estén agotados, los minerales oxidados de cobre y a esa fecha ya se estén empleando masivamente los procesos de lixiviación de concentrados. Toda nueva tecnología requiere por lo menos veinte años para desarrollarse. (Marsden, 2015)

2.1.3. Tecnologías existentes

El 25 por ciento de la producción mundial de cobre, se realiza por procesos hidrometalúrgicos, de los cuales la lixiviación de óxidos y sulfuros secundarios que se realizan por procesos del tipo LIX-SX-EW, en pilas o botaderos (dump) son los predominantes. (Valdivia, 2009)

La tecnología tradicional para el tratamiento de los concentrados de cobre, que fundamentalmente están constituidos por sulfuros primarios como la calcopirita, es la fundición y refinación para obtener cátodos refinados de cobre, sin embargo, en los últimos años a raíz del significativo desarrollo que ha ocurrido en la lixiviación de la calcosina, se ha consolidado, la lixiviación en pilas de los sulfuros secundarios. En la lixiviación de la calcopirita también está ocurriendo grandes innovaciones, si bien no tanto en la lixiviación en pilas, si lo está haciendo en la lixiviación de los concentrados, pero sin llegar a constituirse todavía en una alternativa general a la vía clásica de tratamiento de los concentrados de cobre por fundición y refinación electrolítica. Sin embargo, en los últimos 20 años, se han desarrollado varios procesos en esta dirección, algunos de los cuales ofrecen grandes expectativas a futuro. Se debe indicar que para algunas condiciones muy específicas ya se vienen aplicando a nivel industrial determinados procesos de lixiviación de

concentrados, o como operaciones complementarias para obtener subproductos como ácido sulfúrico. (Valdivia, 2009)

Desde hace quince años se vienen desarrollando procesos en los que las autoclaves tienen un rol preponderante y amenazan con pasar a ser las dominantes, incluso reemplazar en algunos proyectos la fundición de la calcopirita. (Valdivia, 2009)

En el presente estudio, se considerarán solamente los procesos que utilizan las autoclaves, porque se ha estimado que este tipo de procesos serán los que se consoliden a futuro como la mejor alternativa para que hidrometalurgia prevalezca sobre la vía pirometalúrgica, por las siguientes razones. (Valdivia, 2009)

Los costos de inversión para producir cobre electrolítico por la vía fundición refinería son del orden de 3 000 a 6 000 \$/ t Cu año versus la vía hidrometalurgia es de 1 000 a 2 000 \$/ t Cu año. (Marsden, 2015)

Los minerales oxidados de cobre se agotarán en un tiempo no muy lejano y la producción de ácido sulfúrico excederá la demanda, pero con las autoclaves se tendrá la posibilidad de controlar su producción y

establecer equilibrios óptimos para tratar los minerales sulfurados de cobre de alta y baja ley en circuitos cerrados y amigablemente ambientales. (Marsden, 2015)

Mayor tolerancia a las impurezas contenidas en los minerales sulfurados de cobre tales como: Se, Te, Hg, As, Sb, Bi, F, Cl), las cuales podrían aumentar a futuro. (Marsden, 2015)

Se pueden tratar concentrados de cobre de leyes más bajas que el promedio actual, tales como 20-25 por ciento de cobre, con la ventaja de aumentar la recuperación de los metales preciosos. (Marsden, 2015)

Estos procesos hidrometalúrgicos a diferencia del piro metalúrgico pueden permitir un crecimiento modular y resolver con mayor facilidad las expansiones de plantas. (Marsden, 2015)

La posibilidad de continuar utilizando la infraestructura existente de SX-EW, relacionada con los minerales oxidados y sulfuros secundarios, con las correspondientes adecuaciones. (Marsden, 2015)

La razón por lo que los desarrollos de estas tecnologías son lentos, son las siguientes:

1. Recuperación de cobre algo menor en las primeras etapas de lixiviación y por su precipitación con la hidrolización del hierro.
2. En algunos casos la baja calidad del cobre producido requiere de un proceso electro refinación.
3. Algunas dificultades en la recuperación de los metales preciosos de los residuos de la lixiviación.

Se tiene problemas en la lixiviación de la calcopirita como; La formación de películas pasivantes en la lixiviación con ácido sulfúrico, que pueden inhibir la oxidación química, lo cual se supera con una molienda ultra fina de 10 - 30 micrones, de modo que la partícula se lixivie antes que se deposite la película pasivante, o utilizando la lixiviación clorurante que no genera pasivación. También usando una temperatura alta, de lixiviación es decir una lixiviación transpasiva. (Valdivia, 2009)

Tabla 1

Procesos de Sulfatación de cobre de operaciones en producción

PROCESO	Situación	Temp. K	Pres.	D80	Cloruro	Observaciones
			atm	µm		
ACTIVOX	Demuestra.	110	12	05- oct	No	Autoclave
Molienda fina combinada con alta presión de oxígeno, es exitoso en la no pasivación de la calcopirita. Dificultad en espesado y filtrado. Debe mejorar la recuperación de metales preciosos. Producto S ⁰ y SO ₄ ⁻² . Medio de lixiviación SO ₄ ⁻² .						
CESL PROCESS	Demuestra.	150	12	37	Si	Autoclave
Lixiviación de la calcopirita catalizada con cloruro, produce un precipitado de sulfato básico de cobre en la autoclave						
DYNATEC	Produce.	150	12	37	No	Autoclave
La calcopirita se lixivia utilizando un carbón de bajo grado como aditivo. Circuito complicado. Falta optimizar recuperación de metales preciosos 80 % S ⁰ , el residuo de lixiviación se flota y recircula en lixiviación, 20 % como SO ₄ ⁻² . Producto S ⁰ . Medio lixiviación SO ₄ ⁻² , con adición de carbón como aditivo.						
PLATSOL	Produce.	225	32	15	Si	Autoclave
TPO con 10-20 g/L NaCl, lixivia al mismo tiempo los metales preciosos como los metales base.						
SEPON COPPER	Produce.	80 Cu		100	No	Autoclave
		220FeS₂		50		Calcocita
Lixiviación férrica atmosférica de la calcopirita. POT del concentrado de pirita para producir ácido sulfúrico y sulfato férrico para lixiviar la calcocita.						
PROCESO						
MT GORDON	Cerrada	90	8	100	No	Autoclave
Convierte el Fe ⁺² en Fe ⁺³ , que se encarga de lixiviar el cobre de la calcosina y de la covelita producida.						
OXIDACIÓN A PRESIÓN TOTAL (TPOX) Kansanshi	Produce	225		15-37	No	Autoclave
				16-32		
Las condiciones extremas de temperatura y presión, descompone rápidamente la calcopirita y otros sulfuros. Producto SO ₄ ⁻² . Medio de lixiviación SO ₄ ⁻² .						

Fuente: Valdivia, 2009

La tabla 1, nos muestra los diferentes tipos de procesos de lixiviación de concentrados de cobre en autoclave, diferenciándose algunos en que además del ácido sulfúrico utilizan cloruro de sodio para mejorar la cinética. Se aprecia las variables de alta temperatura y presión y una granulometría promedio de 15 a 37 micras con calcopirita y de 100 micras con calcosita que es más lixiviable.

Estos procesos tienen tres características importantes:

- Disuelven el cobre de los concentrados de calcopirita.
- Purifican las soluciones de cobre con procesos modernos de separación.
- Producen cobre de alta calidad.

Los procesos en desarrollo, se pueden dividir en dos grandes grupos; los que usan un medio sulfato y los que usan cloruro. Los de sulfato, se dividen en atmosféricos o super-atmosféricos en cuanto a presión y químicos o biológicos en cuanto a los procesos de lixiviación. (Valdivia, 2009)

Los procesos: Activox, CESL, Dynatec, crearon una gran expectativa durante algún tiempo pero han perdido importancia.

Tabla 2

Desarrollos recientes de operaciones en producción

MINA	PRODUC.	ESTADO	MINERAL
t/año Cu			
Mt. Gordon, Australia	500,00	Cerrado 2003	Calcocita, autoclave, para convertir Fe^{+2} en Fe^{+3} , que lixivia la calcosina y covelita producida. La pulpa se envía a lixiviación atmosférica.
PD/Freeport Bagdad USA	160,00	Actual MoS_2	
Alliance Copper, Chile	200,00	2 años Demo	
Sepon Copper, Laos	900,00	En operación	Calcocita, autoclaves para lixiviar la pirita.
Tabla 2. Continuación			
Kansanshi, Zambia	2 500,00	En operación	Calcopirita, lix. En autoclaves.
Phelps Dodge (Freeport Morenci) USA	750,00	Larga historia	HTPOX y MTOX Est. Factibilidad
Cobre Las Cruces, Spain	720,00	En operación	Calcocita, no usa autoclaves
CESL Process, Vale Brazil	100,00	Planta Demo	

Fuente: Valdivia, 2009

En general puede decirse que los procesos hidrometalúrgicos persiguen lo siguiente:

- Producir una solución de cobre, que se pueda procesar a continuación por algún método de extracción para obtener el metal cobre.
- Producir un metal ya sea, a partir de un metal impuro o de un compuesto impuro que hayan sido preparado por una secuencia de operaciones metalúrgicas.
- Producir un metal directamente de un mineral, y un concentrado.

En líneas generales las principales ventajas de la hidrometalurgia son:

- Evita la contaminación atmosférica.
- Bajos costos de inversión por unidad de capacidad de planta.
- Posibilidad de expansión de una operación pequeña a otra de tamaño mediano, conservando siempre la economía de una operación en gran escala. Esto es debido al carácter modular de las plantas hidrometalurgias.

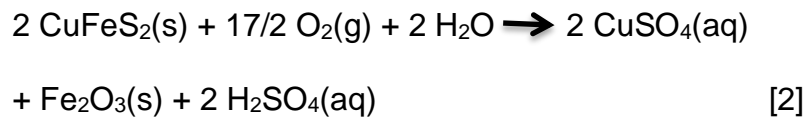
2.2. Bases teóricas

2.2.1. Físico química de la lixiviación de los sulfuros en autoclave referencia (Valdivia, 2009)

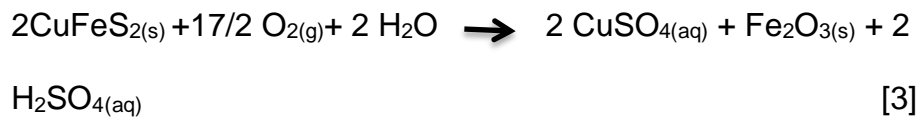
Oxidación de la Pirita en Autoclave



Oxidación de la Calcopirita en Autoclave



2.2.2. Oxidación de la Calcopirita en autoclave



Reacción para residuos de autoclave



El residuo de la autoclave se lixivia a 363 K

El tiempo de residencia es de 2 horas

Las variables del proceso consideradas para realizarla son: agitación de la pulpa, concentración de ácido sulfúrico, temperatura y presión de oxígeno. La agitación debe ser del orden de 500 rpm y una concentración de ácido sulfúrico de 0,1 M, los cuales no tienen una influencia mayor en la cinética, pero un incremento de la temperatura de 363,15 a 381,15 K (90 a 108 °C), incrementan la disolución del cobre y el hierro, y un incremento por encima de 393,15 K (120 °C) afecta negativamente la extracción del cobre. La presión parcial del oxígeno resulta ser la principal variable para controlar la relación de selectividad entre el cobre y el hierro, dado que un incremento de la presión parcial del oxígeno incrementa significativamente la extracción del cobre, pero deteriora la selectividad cobre/hierro. La mayor parte del azufre del concentrado se oxida a azufre elemental. (Padilla, 2007)

El azufre elemental se controla con la temperatura, dado que, a temperaturas medias del orden de los 423,15 K (150 °C), se obtiene el 65 % a 70 % del total de azufre ingresado en la forma de azufre elemental, generando aproximadamente un tercio de ácido sulfúrico comparado cuando la temperatura es mayor a 473,15 K (200 °C).

La selección del método de lixiviación depende de las características físicas y químicas del mineral y los minerales asociados a ser tratados. Los factores más importantes son: el grado de mineral, las solubilidades del valor metálico, la cinética de la disolución, el consumo de reactivo, el tamaño de la operación, el tipo de los minerales, etc. (Marsden, 2015).

2.2.3. Lixiviación por agitación a presión

Las ventajas de la lixiviación a presión sobre la lixiviación a presión atmosférica es que una presión más alta permite la operación a temperaturas más altas. Esto incrementa de la velocidad de lixiviación. Las desventajas, sin embargo, son que los costos capitales de los recipientes a presión son muchos más altos, se requiere un mayor entrenamiento del operador. (Marsden, 2015).

Uno de los factores de interés en la lixiviación de sulfuros es el aspecto cinético de la reacción. La mayoría de los óxidos metálicos son fácilmente disueltos en ácidos, pero la disolución de minerales sulfurados en medio ácido es usualmente lenta. Como resultado, a mayoría de los procesos de lixiviación de sulfuros requieren la presencia de un agente oxidante, y condiciones de pH, para efectuar su disolución. Las

reacciones son de óxido-reducción, y en ciertos casos, para favorecer el proceso, se necesitan condiciones de temperatura y presión. El uso de agentes catalizadores como microorganismos es también una alternativa viable. (Marsden, 2015).

2.3. Definición de términos

2.3.1. Autoclave

Equipo herméticamente cerrado de acero inoxidable con capacidad de agitación, que trabaja a altas temperaturas y altas presiones, apto para lixiviar concentrados de cobre.

2.3.2. Lixiviación de concentrados

Se refiere a la lixiviación de concentrados sulfurados de cobre, que consiste en extraer el cobre por acción de la reacción del oxígeno con todos los sulfuros de cobre del concentrado.

2.3.3. Presión parcial de oxígeno

Presión del oxígeno dentro de la autoclave y que resulta ser la variable independiente más importante del proceso.

2.3.4. Tiempo de retención

Es el tiempo durante, el cual se desarrolla el proceso y que es del orden de una a dos horas.

2.3.5. Tamaño de partícula

Es el tamaño de la partícula del concentrado, está representado por el 80 % pasante de un análisis granulométrico.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Investigación experimental explorativo

Gran parte de la investigación en el campo de la ingeniería, ciencia e industrias es empírica y emplea en forma extensiva la experimentación.

Mantener el diseño y análisis tan simples como sea posible. No se debe exagerar el uso de técnicas estadísticas complejas y muy refinadas. Por lo general, lo más adecuado son los métodos de diseño y análisis relativamente simples. Si se realiza un diseño simple cuidadoso correctamente, el análisis será con frecuencia, relativamente directo.

Reconocer la diferencia entre la significación práctica y la estadística. Un resultado estadístico notable puede verse demasiado pequeño desde el punto de vista práctico si el costo de la modificación para lograr el resultado es alto.

Usualmente los experimentos son iterativos o secuenciales. Hay que recordar que en la mayoría de los casos no es conveniente diseñar experimentos demasiado extensos en las primeras etapas de un estudio. Un diseño exitoso requiere que se conozcan los factores importantes, los intervalos en los que estos factores van a ser investigados, el número apropiado de niveles para cada factor y las unidades de medición adecuada a cada factor y respuesta. Generalmente, al inicio de un experimento no se está en condiciones de responder adecuadamente a estas preguntas, pero es posible conocer las respuestas a medida que avanza la experimentación. Esto favorece el empleo del enfoque iterativo o secuencial considerando.

3.1.2. Diseño de la investigación exploratorio

La investigación tiene carácter de investigación experimental exploratoria por su complejidad, porque son siete variables independientes que se deben establecer para obtener resultados en seis variables dependientes entre las cuales se pueden citar la temperatura por la variación que se realiza.

1. Extracción de cobre
2. Concentración de cobre en la cosecha
3. Volumen de la solución cosecha

Esta cantidad de variables exige un programa de pruebas empleando el diseño experimental, lo cual no se ha considerado en el presente estudio, dado que el objetivo es fijar seis variables independientes para el inicio de cada prueba y solo variar la temperatura de 363,15 a 423,15 K (90 °C a 150 °C.) Las seis variables independientes permanecen fijas para poder determinar el nivel de extracción de cobre y en consecuencia la concentración de la cosecha lograda, así como su PH y volumen cosechado, dado que el ripio retendrá una cantidad de solución y el volumen recepcionado será menor en cada carga que la solución alimentada al proceso.

3.2. Población y muestra

La muestra de concentrado de cobre ha sido suministrada por Southern Perú Mina Toquepala, en un cilindro de 300 kilogramo, se empleó la técnica de cono y cuarteo fraccionándolo hasta obtener una muestra representativa de aproximadamente cuatro a cinco kilogramo, la cual nuevamente fue homogenizada y cuarteada hasta obtener nuevas

muestra fraccionadas en un peso de aproximadamente de 1 800 a 2 500 gramos para luego extraer los 300 gramos de concentrado de cobre para cada prueba realizándose previamente un homogenización.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1. Variables independientes

- Volumen de solución de alimentación
- Concentración de ácido sulfúrico
- Temperatura de proceso
- Presión en la autoclave
- Tamaño de partícula de concentrado
- Tiempo de proceso

3.3.2. Variables dependientes

- Recuperación de cobre
- Concentración de cobre en la cosecha
- PH de la cosecha
- Volumen de solución de la cosecha.

Tabla 3

Operacionalización de variables

INDICADORES	UNIDADES
Tiempo de reacción	minutos
Temperatura	K
Volumen de solución	litros
Recuperación	%
Tamaño de partícula	micras
Concentración Cu	g/L Cu
Concentración Ac	g/L Ac

Fuente: Elaboración propia

3.4. Técnicas de instrumentos y para la recolección de datos

El proceso en la autoclave en su mayoría tuvo una duración de 90 minutos, después de los cuales se procedió a cosechar la solución concentrada, dejando reposar para ser decantada y de esa parte tomar las muestras para filtrado y análisis químico. El residuo fue lavado, tres veces con un volumen total 10 litros de agua para proceder al análisis de los ripios.

También se prepararon muestras, para ser analizadas en el microscopio electrónico de barrido SEM, cuyos resultados han servido para comparar la extracción de cobre por soluciones y por cabeza-ripió.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Con el Microsoft Excel 2010 (licencia) se ha llevado a cabo el análisis de los datos, así como el diseño de la autoclave. Una de las capacidades más interesantes de Excel es la actualización automática de los cálculos, lo que permite disponer de los resultados, tablas, figuras y gráficos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA AUTOCLAVE

Para el diseño y construcción de la autoclave que ha permitido realizar las seis pruebas de lixiviación de concentrado de cobre de la Mina Toquepala se ha tenido en cuenta los siguientes parámetros, que se ha basado en cálculos teóricos.

Tabla 4

Operacionalización de variables de autoclave

VARIABLES	UNIDADES	PARÁMETROS
Diámetro de la autoclave	Dm	1,45
Altura de la autoclave	Dm	2,42
Área transversal de la autoclave	dm ²	1,65
Volumen de la autoclave	dm ³	3,99
Porcentaje de uso autoclave	%	50
Volumen de uso de la autoclave	dm ³	1,997
Densidad real del concentrado	g/m ³	2,8

Fuente: Elaboración propia

Continuación...

Porcentaje de solidos	%	15
Cantidad de concentrado	kg	0,3
Ley del concentrado:	%	25
Contenido de cobre total	kg	0,075
Contenido de cobre soluble	kg	
Recuperación:	%	90
Producción de cobre fino	kg	0,067
Volumen del concentrado	dm ³	0,107
Adición de solución	dm ³	1,89
Concentración promedio de la cosecha:	g Cu/L	35,66
Flujo de la lixiviación por carga	L	1,89
Consumo oxígeno para S elemental	Kg oxigeno /kg Cu	0,56
Consumo oxígeno para ácido sulfúrico	Kg Oxigeno /kg ácido	2,15

Fuente: Elaboración propia

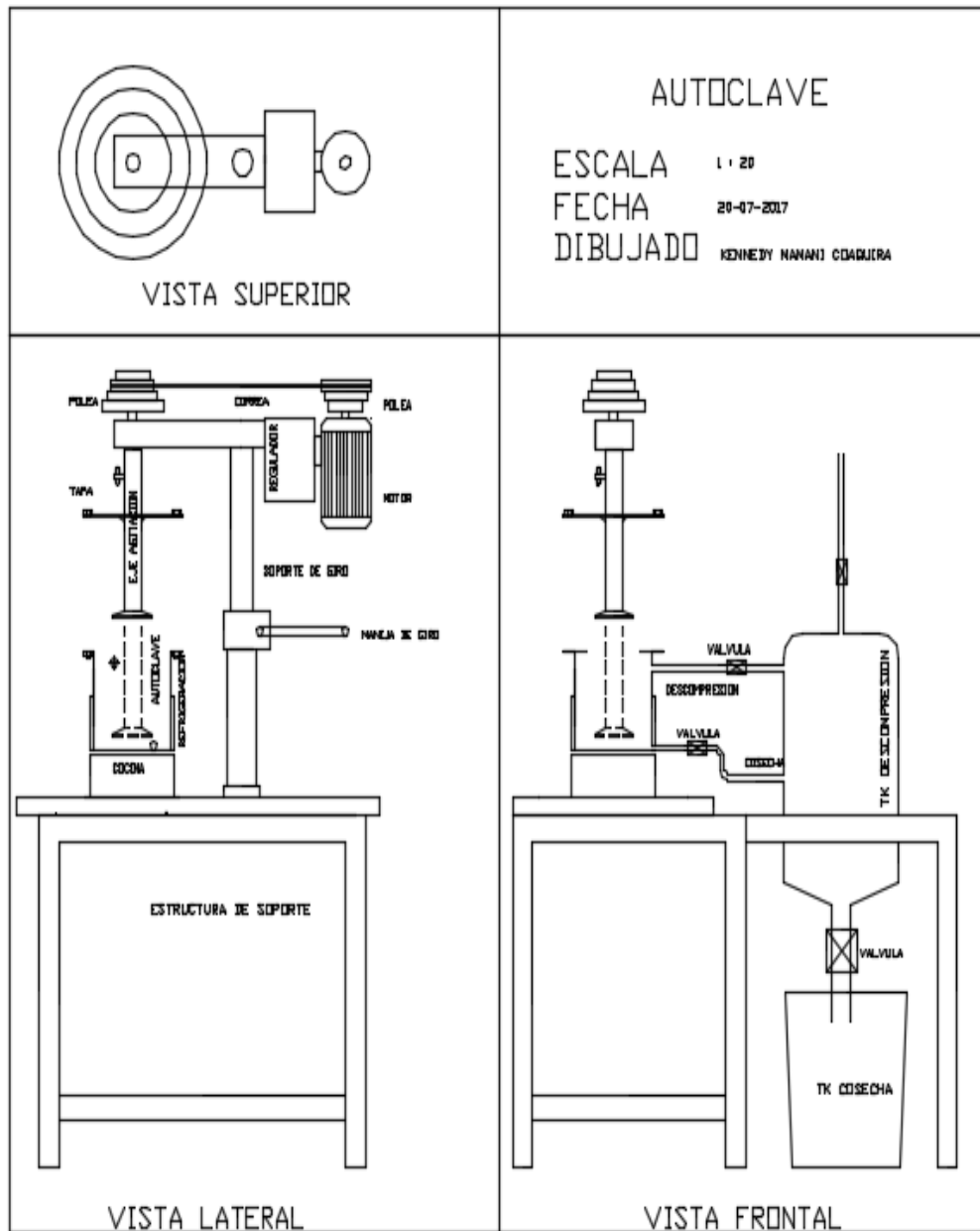


Figura 2. Plano de autoclave construida

Fuente: Elaboración propia

Para la construcción de la autoclave, se partió de un peso de muestra de concentrado de 300 gramos y a partir de ello se procedió a determinar el volumen útil de la autoclave, considerando el volumen de agua a utilizarse en base a un 15 % de dilución de sólidos. Luego considerando el 50 % de volumen útil, se obtuvo el volumen de la autoclave de 3,99 dm³. Luego se consideró una altura de 2,42 dm³ teniendo en cuenta las posibilidades que ofrecía el equipo que se estaba reformado de una celda de flotación a una autoclave. Con el área obtenida se procedió a calcular el diámetro de la autoclave.

4.2. Resultados

4.2.1. Desarrollo de pruebas en laboratorio

a) Muestra de concentrado

Se obtuvo una muestra de concentrado proveniente de la mina de Toquepala a menos malla 200, representativa de las características mineralógicas del mineral sulfurado existente en la región de Tacna, el análisis mineralógico realizado por microscopio electrónico de barrido reportó una ley una ley de 27,01 %, de cobre principalmente como calcopirita, por lo que se concluye que la muestra estudiada pertenecen a

la zona de mineralización primaria con predominancia de calcopirita y baja presencia de minerales secundarios como la calcosita y óxidos de cobre, que estarían incorporados dentro de otros.

El análisis por SEM de la Escuela de Metalurgia y Materiales del concentrado de Toquepala dio el siguiente resultado:

Tabla 5

Composición química del concentrado de Toquepala

COMPONENTE	%
Cu	27,01
Fe	23,25
Si	11,07
Al	6,32
S	27,72
Otros	4,63
TOTAL	100

Fuente: Laboratorio de microscopio electrónico ESME

En la tabla 5, nos muestra la ley del concentrado de 27,01 % que se ha sometido a las pruebas de lixiviación en autoclave los otros componentes se han recalculado calculando en base al porcentaje del elemento suministrado por el análisis SEM.

b) Ácido sulfúrico

Se utilizó ácido sulfúrico químicamente puro de 98 % de concentración V/V.

Los equipos utilizados son los siguientes:

- ✓ Autoclave
- ✓ Balón de oxígeno
- ✓ Cocina eléctrica
- ✓ Tanque de descompresión

La autoclave fue construida por el ponente, a partir de una celda de flotación dada de baja, pero que presentó dificultades para lograr el sellado al 100 % de los prensaestopas en el eje de agitación, debiendo renovarse el empaque cada dos pruebas.

Resulta sumamente difícil corregir este defecto por no haber espacio para hacerlo, siendo este problema una limitante para realizar todo un programa de pruebas. La mejor alternativa para continuar la investigación de lixiviación de concentrados en autoclave es la compra de una autoclave de marca de 1 a 2 litros de capacidad.

A continuación, se presenta una fotografía de la autoclave con la que realizaron las pruebas:



Figura 3. Autoclave construida

Fuente: Elaboración Propia

La figura 1, muestra la autoclave con la que se realizaron las pruebas y que consta de las siguientes partes:

- El reactor o propiamente la autoclave.
- El sistema de agitación.

- La cámara de enfriamiento con flujo de agua para la regulación de la temperatura.
- El tanque de descompresión.
- La cocina eléctrica para la elevación inicial de la temperatura.
- El balón de oxígeno.
- El embudo de alimentación de la pulpa a lixiviarse.

c) Parámetros operativos

Las pruebas se desarrollaron a condiciones ambientales naturales en el laboratorio de la ESME. Las variables controladas periódicamente durante el desarrollo de las pruebas son las siguientes:

Tabla 6

Parámetros operativos

PARÁMETROS OPERATIVOS
Extracción de cobre
Producción de ácido sulfúrico
pH
Mv
Temperatura
Presión
Consumo de oxígeno
Producción de azufre elemental

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2. Resultado de las pruebas en autoclave

4.2.2.1. Parámetros de operación

Tabla 7

Parámetros de operación del proceso de lixiviación en autoclave

PARÁMETROS DE OPERACIÓN					
N° PRUEBA	TEMPERATURA K	PRESIÓN kPa	TIEMPO minutos	TAMAÑO μM	LEY CONCENTRADO %
1	363,15	1034,22	60	75	27,01
2	363,15	1034,22	90	75	27,01
3	363,15	1034,22	90	75	27,01
4	363,15	1034,22	90	75	27,01
5	423,15	1034,22	90	75	27,01
6	423,15	1034,22	90	75	27,01

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7, se aprecia los valores dados a las variables independientes, de temperatura, presión y tiempo la condición de tamaño de partícula y la ley del concentrado.

4.2.2.2. Alimentación y cosecha

En la tabla 8, se aprecia el volumen de la pulpa alimentada de 1,89 litros, con una concentración inicial de ácido sulfúrico de 45 g/L cobre, habiéndose obtenido 1,63 L de cosecha en promedio, dado que no se pudo medir todas las cosechas, teniendo que tomarse el promedio para cada una de ellas, habiéndose apreciado muy poca diferencia y mínimo error con esta consideración. La concentración de cosecha obtenida en promedio es 22,12 g/L cobre para los resultados de las pruebas 1 a 4.

Tabla 8

Alimentación y cosecha

N° PRUEBA	ALIMENTACIÓN		COSECHA (PLS)		
	VOLUMEN litros	H ₂ SO ₄ g/L	VOLUMEN Prod. litros	CONCENTRACIÓN g/L Cu	PH
1	1,89	45,00	1,63	22,50	1,31
2	1,89	45,00	1,63	22,00	1,50
3	1,89	45,00	1,63	23,00	1,46
4	1,89	45,00	1,63	21,00	1,13
5	1,89	45,00	1,63	6,57	1,07
6	1,89	45,00	1,63	6,77	1,06

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3. Resultados de las pruebas

Tabla 9

Resultado de pruebas de lixiviación de concentrado

N° PRUEBA	EXTRAC Cu POR SOLUCIONES %	EXTRAC Cu CABEZA - RIPIO %
1	52,84	44,47
2	51,66	51,20
3	54,01	53,72
4	49,31	50,02
5	15,43	--
6	15,90	--

Fuente: Elaboración propia

La tabla 9, muestra los resultados obtenidos para la extracción de cobre, comparando los valores calculados a partir de los resultados de análisis de las cosechas con los valores obtenidos mediante el análisis el análisis con microscopio electrónico de barrido SEM de la ESME, observándose cierta correlación.

Tabla 10

Pruebas de extracción y concentración

PRUEBA	EXTRACCIÓN	Cu %	CONCENTRACIÓN gpl Cu
1		52,84	22,5
2		51,66	22
3		54,01	23
4		49,31	21

Fuente: Elaboración propia

Línea de tendencia

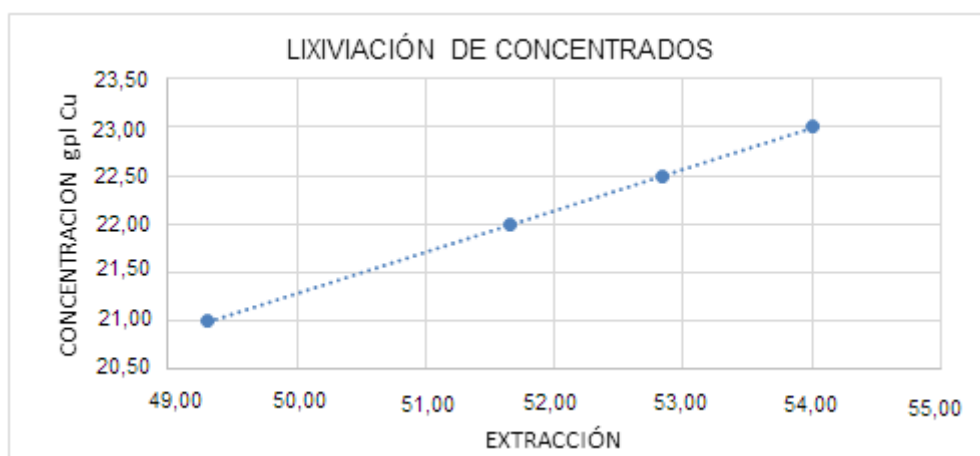


Figura 4. Línea de tendencia

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4. De línea de tendencia, se aprecia que con una mayor extracción se obtendrá una mayor concentración de cosecha.

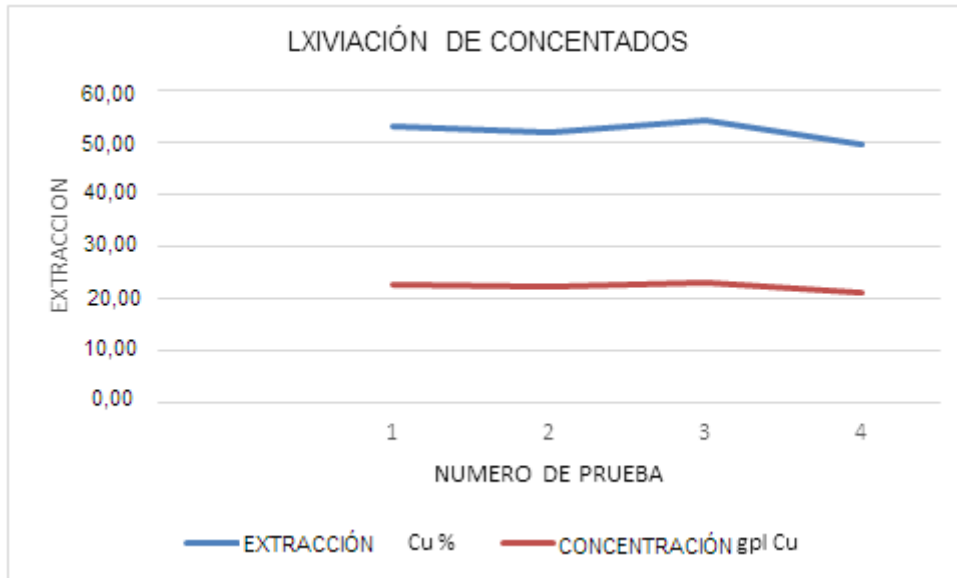


Figura 5. Correlación.

Fuente: Elaboración propia

En el Figura 5. De correlación, se aprecia una muy buena correlación entre la extracción y la concentración de la cosecha obtenida.

4.2.2.4. Resultado del Análisis del Ripio por SEM

El análisis del ripio de la lixiviación del concentrado en autoclave realizado en el microscopio electrónico de barrido SEM de la Escuela de Metalurgia y Materiales, dio el resultado que se muestra en la tabla 10.

Tabla 11

Análisis de ripio del concentrado

PRUEBA	% Cu
1	15,0
2	13,2
3	12,5
4	13,5
5	22,5
6	23,0

Fuente: Laboratorio de microscopio electrónico ESME

4.2.3. Procedimiento de las pruebas

1. Preparar la solución de lixiviación en un recipiente agregando 1,5 L de agua.
2. Agregar al recipiente 40,7 mL de H_2SO_4 , lentamente para evitar calentamiento brusco de la solución y luego enrasar a 1,9 litros que es el volumen de solución de alimentación a la autoclave.
3. Adicionar 300 g de concentrado y agitarlo.
4. Alimentar la mezcla a la autoclave.
5. Serrar la autoclave de una manera hermética y segura.
6. Calentar la solución de la autoclave de modo eléctrico hasta la temperatura de 363,15 K (90 °C).

7. Inyectar oxígeno hasta alcanzar la presión determinada de 1 034,22 kPa
8. Arrancar el sistema de agitación para la mezcla sólido – líquido - gas, manteniendo durante la prueba la presión y la temperatura constantes.
9. Regular la temperatura con refrigeración de agua a través de la cámara de enfriamiento.
10. Mantener la presión constante adicionando oxígeno a través de la válvula correspondiente.
11. Terminada la prueba según el tiempo establecido, se abre la válvula de purga de la autoclave hacia la cámara de descompresión para bajar la presión a 137,90 kPa para ayudar la evacuación de la pulpa y luego cerrarla.
12. Abrir la válvula de evacuación de la mezcla para pasar la solución sólida – líquido – gas hacia la botella de recepción, manteniendo la agitación.
13. Desmontar la autoclave y lavar con un litro de agua la autoclave y la cámara de descompresión dos veces y recibir esta solución en un recipiente diferente al de la botella, para calcular el volumen de cosecha correctamente agregando el incremento sobre dos litros de

agua agregados, el incremento se considera de la misma concentración de la cosecha.

14. Dejar que sedimente el ripio de la botella y filtrar la solución cosecha.
15. Lavar el ripio (incluido el filtrado y el ripio del lavado) con la solución de lavado dos veces.
16. Analizar la concentración de la solución cosecha para cobre y ácido.
17. Analizar la concentración de la solución de lavado para cobre y ácido.
18. Realizar los cálculos para corregir la concentración de la solución cosecha adicionando los valores obtenidos en la solución de lavado de la autoclave.
19. Analizar la ley de la cabeza y del ripio en cobre para determinar el porcentaje de extracción de cobre.
20. Por balance determinar el consumo de ácido.
21. Las pruebas a nivel de laboratorio se pueden realizar en una autoclave de una capacidad de uno a dos litros, equipado con sus instrumentos de control para temperatura y presión, con una velocidad de agitación de 1 000 RPM.

4.2.4. Discusión

La extracción de 50 %, que corresponde a una concentración de cosecha promedio de 22,12 g/L cobre, está justificada al haber lixiviado a P80 de 80 micras, debiendo hacerse óptimamente a 15 micras, al haber operado con una temperatura de 363,15 K (90 °C), debiendo lixivarse a 423,15 K (150 °C) y con un tiempo de proceso de 90 minutos, pudiendo hacerse con 120 minutos.

Cuando se disponga de un molino de molienda ultra fina y de una autoclave de marca, se alcanzarán extracciones mayores a 90 %, como lo está logrando la planta de Kansanshi, en Zambia, África con una granulometría de 15 a 30 micras y a temperaturas de 523,15 K (250 °C) y 1 723,70 kPa

La variable tamaño de partícula parece ser la de mayor influencia en la recuperación de cobre, lo cual se deduce de la baja extracción de cobre obtenida en las pruebas.

La mayor temperatura promueve la lixiviación del hierro de la calcopirita, aumentando su concentración en la solución cosecha, por lo que es de interés investigar la lixiviación a temperaturas como máximo de 423,15 K (150 °C).

El tiempo de retención es importante y puede ser que los 90 minutos no sean suficientes y se tenga que aumentar a 120 minutos como máximo. Esta variable está muy relacionada con la granulometría del concentrado, por lo que para cuantificarla es necesario realizar pruebas a un P80 de 15 micras.

El proceso de lixiviación de concentrados sulfurados en autoclave es productor de ácido sulfúrico y cuyo nivel de producción se controla con la temperatura.

Es necesario medir con exactitud el flujo de oxígeno, dado que la presión parcial del oxígeno controla la selectividad cobre/hierro.

CONCLUSIONES

La lixiviación de concentrados sulfurados de cobre, específicamente de la calcopirita en autoclave, es una tecnología que está en sus primeras etapas de desarrollo, pero que resulta fundamental para asegurar el abastecimiento mundial de cobre y mantener operativas las plantas hidrometalúrgicas de cobre ante el próximo agotamiento de los minerales oxidados y sulfuros secundarios como la calcosina.

Se procedió a lixiviar en autoclave el concentrado de sulfuros de cobre de la Mina de Toquepala, lográndose una extracción de 50 % y una concentración de cosecha de 22,12 g por litro de cobre a una temperatura de lixiviación en la autoclave de 363,15 K (90 °C).

El nivel de extracción bajo es consecuencia de haber lixiviado el concentrado a una granulometría de P80 de 80 micras, que es la granulometría con la que nos fue suministrado el concentrado de Toquepala, equivalente a una malla 200, siendo lo óptimo realizarla a 15 a 30 micras.

Es muy probable que a un tamaño de 15 micras la extracción sea mayor a 90 %, y La concentración más cercana del 30 % de lo

obtenido pero aun logrando este valor quedaría pendiente el estudio de las otras variables del proceso para una siguiente etapa de optimización.

RECOMENDACIONES

Para una mejor evaluación de las variables sobre las cuales no se tiene control como la granulometría, se recomienda contar con un molino de ultra fino para bajar la granulometría a 15 a 30 micras de 80 micras que tiene el concentrado ensayado.

Aunque se ha determinado la lixiviabilidad del concentrado conteniendo principalmente el sulfuro primario calcopirita, es necesario realizar otras pruebas, para determinar la ratio de extracción de Cobre a nivel de optimización piloto, este valor completara la información necesaria para valorar el desarrollo de la operación de lixiviación comercial.

Se debe proceder a adquirir una autoclave de marca de uno o dos litros de capacidad, y un molino de molienda ultra fina, para realizar pruebas incluyendo un mayor número de variables bajo estudio, dado que este tipo de investigación está relacionado con el futuro de la hidrometalurgia del cobre.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dreisinger, D. (2006). *Copper leaching from primary sulfides options for biological and chemical extraction of copper*. España.
- Habashi F. (2007). *Copper metallurgy at the crossroads*. Canada.
- Habashi F. (2007) *Copper Metallurgy at the crossroads*. Canada
- Jom. W. (2008). *Copper leaching from chalcopyrite concentrates*. LIMA.
- Marsden, J. (2015). *Medium-temperature pressure leaching of copper concentrates – part iv: application at Morocón, Arizona*
- Natsardorj B. (2009). *Development strategies for Erdenet copper mine*. Australia.
- Padilla, R., Vega, D., and Ruiz, (2007) M. C., *Metalurgia*. España
- Tapia, G. (2007). *Progress in copper hydrometallurgy in Anglo American*.
USSA
- Valdivia. Z. (2009). *Hidrometalurgia del cobre curso teórico práctico*