



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y  
MATERIALES

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LIXIAVILIDAD DE ROCA MINERALIZADA  
MEDIANTE TÉCNICAS DE LIXIVIACIÓN IN SITU**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

**MATÍAS ANDRÉS VALDÉS ZALDÍVAR**

PROFESOR GUÍA:

TOMÁS VARGAS VALERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

HUMBERTO ESTAY CUENCA

HUMBERTO PALZA CORDERO

DANIEL CARRIZO SANTIAGO

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE Ingeniero Civil Químico

POR: Matías Andrés Valdés Zaldívar

FECHA: 17/07/2018

PROF. GUÍA: Tomás Vargas Valero

## EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LIXIAVILIDAD DE ROCA MINERALIZADA MEDIANTE TÉCNICAS DE LIXIVIACIÓN IN SITU

El presente trabajo consiste en la elaboración de diseño y planificación de la operación de lixiviación para una planta de in situ mining (ISM) basada en la explotación por caserones.

La lixiviación in situ mediante caserones consiste en la preparación de una unidad subterránea mediante tronadura para aumentar la permeabilidad y así poder inyectar un flujo de solución lixivante para extraer el mineral objetivo del yacimiento. Estas soluciones son captadas en las galerías en la base del caserón y el cobre es recuperado en la planta de SX-EW.

Se define una metodología para caracterizar las cinéticas de lixiviación de cobre y de consumo de ácido del mineral. La cinética de lixiviación de cobre permite extrapolar los resultados a cualquier diámetro de partícula deseado y la cinética de consumo de ácido del mineral permite extrapolar el consumo para cualquier concentración de ácido mayor a 5 [g/L].

Se desarrolla un modelo matemático que permite simular la velocidad de lixiviación de cobre y del consumo de ácido a través del tiempo para la explotación de caserones. La mejor recuperación global de cobre corresponde a un 62% y se obtiene simulando un diámetro de partícula de 8 pulgadas con una concentración de ácido de 10 [g/L].

Se plantea una planificación de operación para lixiviación in situ de caserones en función de su tiempo de producción y los resultados obtenidos por el modelo. La operación óptima se obtiene al lixiviar caserones con un desfase de tiempo de 3.187,5 horas debido a su estabilidad en las concentraciones de salida de cobre y de ácido, además de poseer un menor tiempo total de operación.

# Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia y todos mis amigos, son una parte importante de mi vida y no podría lograr las cosas sin ustedes.

Quiero agradecer a mi profesor guía Tomás Vargas y al AMTC (Advanced Mining Technology Center) por darme la oportunidad de desarrollar mi memoria de título en el proyecto basal “Desarrollo de metodologías para el mejoramiento de la tecnología de lixiviación in.situ”.

También me gustaría agradecer al profesor Humberto Estay, quien un apoyo constante en el proceso de realizar el modelo computacional. Además, agradecer al profesor J. Cristian Salgado por permitirme usar su laboratorio computacional para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, doy las gracias a todos los que fueron parte de este proceso universitario, ya sea como profesor, compañero, secretaria, entre otros. Y hacer una mención especial al equipo de rugby de la facultad “Diablos de Ingeniería” que me dio un grupo de amigos para toda la vida.

# Tabla de contenido

1. Introducción.....	10
1.1. Motivación.....	10
1.2. Antecedentes.....	10
1.2.1. Minería en Chile.....	10
1.2.2. Lixiviación.....	11
1.2.3. Lixiviación in situ.....	12
1.2.4. Modelo del núcleo sin reaccionar.....	13
2. Objetivos y alcances.....	16
2.1. Objetivo general.....	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
2.3. Alcances.....	16
3. Estudios preliminares.....	17
3.1. Curvas de recuperación de cobre.....	17
3.2.1. Razón de lixiviación.....	21
4. Diseño del caserón.....	22
4.1. Preparación de la cara libre del caserón.....	23
5. Cinéticas de lixiviación de cobre y de consumo de ácido del mineral.....	24
5.1. Experimento realizado anteriormente.....	24
5.2. Caracterización de la cinética de lixiviación de cobre.....	28
5.3. Caracterización de la cinética de consumo de ácido del mineral.....	30
6. Simulación de lixiviación in situ.....	31
6.1. Modelo de lixiviación in situ.....	31
6.2. Condiciones y parámetros utilizados.....	33
6.3. Resultados de la simulación.....	34
7. Planificación de la operación.....	50
7.1. Ritmo de producción de caserones.....	50
7.2. Ritmo de operación de caserones.....	52
Conclusiones.....	55
Bibliografía.....	56
Anexo A.....	57

Anexo B.....	59
B.1. Ejemplo de cálculo de la razón de lixiviación .....	59
Anexo C.....	61
C.1. Función de recuperación de cobre.....	61
C.2. Función de consumo de ácido .....	61
C.3. Programa de modelo de lixiviación.....	61

# Índice de ilustraciones

Figura 1: Producción y precio del Cobre 2003 – 2017, acumulado a abril para Chile y a marzo para el resto del mundo, además promedio del precio a mayo 201.....	11
Figura 2: Diagrama de ejemplo de lixiviación in situ. ....	12
Figura 3: Diagrama de explotación de LIS mediante caserones (stope leaching).....	13
Figura 4: Diagrama de las etapas del mecanismo de lixiviación.....	14
Figura 5: Diagrama explicativo de la disminución de la velocidad de lixiviación a través del tiempo. ....	15
Figura 6: Gráfico de recuperación (%) vs Ciclo (días) [11]. ....	18
Figura 7: Gráfico de recuperación (%) vs Ciclo (días) con las curvas cinéticas de p80 10", 15" y 18" proyectadas. ....	19
Figura 8: Curva cinética de recuperación de cobre hasta un tiempo de 2200 días.....	21
Figura 9: Curvas cinéticas de recuperación de cobre versus RL y de recuperación versus ciclo, respectivamente. ....	22
Figura 10: Diseño de ejemplo, vista isométrica [11]. ....	23
Figura 11: Diagrama de generación de cara libre en un caserón mediante LBH. ....	23
Figura 12: Método de Long-Hole Stopping, con perforación de Long blast holes para tronadura [14]. ....	24
Figura 13: Montaje experimental de lixiviación de óxidos de cobre [15]. ....	25
Figura 14: Cinética de lixiviación de cobre para diferentes concentraciones de ácido en la solución lixivante [15]. ....	26
Figura 15: Consumo de ácido en el tiempo para diferentes concentraciones de solución lixivante [15]. ....	26
Figura 16: Razón entre el consumo de ácido en la solución lixivante y el cobre disuelto que es capaz de extraerse [15]. ....	27
Figura 17: Razón entre el consumo de ácido del mineral acumulado y el cobre disuelto acumulado frente a la concentración de ácido en la solución lixivante. [15] ....	27
Figura 18: Modelo del N.S.R. controlado por la difusión. [15] ....	28
Figura 19: Modelo del N.S.R. controlado por la difusión para concentraciones mayores a 5 [gpl]. ....	29
Figura 20: Consumo de ácido para cada concentración de ácido superior a 5[gpl]. ....	30
Figura 21: Diagrama de 100 volúmenes en serie, emulando una configuración CSTR en serie. .	32
Figura 22: Diagrama de flujo general (caja negra) del modelo. ....	33
Figura 23: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 6 pulgadas.....	34
Figura 24: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 6 pulgadas.....	35
Figura 25: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 10[gpl] y partículas de 6 pulgadas.....	35
Figura 26: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 6 pulgadas.....	36
Figura 27: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 6 pulgadas.....	36

Figura 28: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 30[gpl] y partículas de 6 pulgadas.....	37
Figura 29: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 6 pulgadas.....	37
Figura 30: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 6 pulgadas.....	38
Figura 31: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 50[gpl] y partículas de 6 pulgadas.....	38
Figura 32: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 8 pulgadas.....	39
Figura 33: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 8 pulgadas.....	39
Figura 34: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 10[gpl] y partículas de 8 pulgadas.....	40
Figura 35: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 8 pulgadas.....	40
Figura 36: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 8 pulgadas.....	41
Figura 37: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 30[gpl] y partículas de 8 pulgadas.....	41
Figura 38: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 8 pulgadas.....	42
Figura 39: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 8 pulgadas.....	42
Figura 40: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 50[gpl] y partículas de 8 pulgadas.....	43
Figura 41: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 10 pulgadas.....	43
Figura 42: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 10 pulgadas.....	44
Figura 43: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 10[gpl] y partículas de 10 pulgadas.....	44
Figura 44: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 10 pulgadas.....	45
Figura 45: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 10 pulgadas.....	45
Figura 46: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 30[gpl] y partículas de 10 pulgadas.....	46
Figura 47: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 10 pulgadas.....	46
Figura 48: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 10 pulgadas.....	47
Figura 49: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 50[gpl] y partículas de 10 pulgadas.....	47

Figura 50: Recuperación global de cobre para partículas de 6 pulgadas con diferentes concentraciones de ácido.....	48
Figura 51: Recuperación global de cobre para partículas de 8 pulgadas con diferentes concentraciones de ácido.....	48
Figura 52: Recuperación global de cobre para partículas de 10 pulgadas con diferentes concentraciones de ácido.....	49
Figura 53: Configuración de caserones para la mina Quetena [11]. .....	50
Figura 54: Operación de 4 caserones con desfase del 25% del tiempo total de simulación. ....	53
Figura 55: Operación de 4 caserones con desfase de 3.187,5 horas.....	53

# Índice de tablas

Tabla 1: Resultados calculados de la razón de lixiviación. ....	60
---	----

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

En la minería existen depósitos cupríferos que no pueden ser extraídos por métodos convencionales, debido a sus altos costos de explotación, baja ley de cobre, ubicación geográfica y restricciones medioambientales. Una alternativa a la minería convencional es la minería de lixiviación in situ (LIS), la cual no requiere de la extracción del mineral a la superficie y como alternativa utiliza pozos de inyección y extracción mediante los cuales se irriga y recupera solución lixivante que luego se procesa para obtener el cobre deseado. Con el fin de obtener un primer acercamiento a la viabilidad de un proyecto minero de LIS se realiza una revisión bibliográfica del tema y se utilizan los conocimientos adquiridos en el plan de estudios de la carrera para proponer una estrategia de dimensionamiento y diseño de unidad básica de explotación con una posterior propuesta de planificación de producción.

La competencia en la industria del cobre es cada vez más fuerte, pero al ser este un commodity, el precio mundial es una influencia que rige la industria. En la actualidad la capacidad de un proyecto minero de seguir siendo económicamente competitivo en el mercado depende de su capacidad para generar rentabilidad de las inversiones, incluyendo los períodos en los que desciende el precio del cobre. En este contexto, los altos costos de extracción y recuperación del cobre generan la necesidad de buscar métodos de minería alternativos que posean menores inversiones de capital y costos de operación.

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Minería en Chile

Según el Ministerio de Minería, se define ley de mineral como *“la concentración de oro, plata, cobre, estaño, etc. presente en las rocas y en el material mineralizado de un yacimiento”*[1], también se define ley de cobre como *“el porcentaje de cobre que encierra una determinada muestra. Cuando se habla de una ley del 1% significa que en cada 100 kilogramos de roca mineralizada hay 1 kilogramo de cobre puro”*[2].

En Chile, la minería es una de las actividades económicas más importantes representando un 9% del producto interno bruto (PIB) y un 6% del ingreso fiscal aproximadamente [3]. El cobre resalta como el principal producto de esta actividad con una producción de 5.545 [KTMF] (kilo toneladas métricas de material fino) el año 2016 [4], representando más del 90% de las exportaciones mineras nacionales [3]. En la figura 1 se puede apreciar la producción de cobre nacional y su precio.

Un creciente problema existente en la minería actual es la baja ley de los depósitos minerales, específicamente la ley de cobre ha disminuido de un 3,5% desde principios de los años 1900 hasta un 0,7% en la actualidad [5]. Esto hace que la explotación de los yacimientos minerales de cobre sea cada vez más costosa económicamente, es decir, cada vez menos factible. Es por esta razón que se buscan nuevas tecnologías y métodos de explotación minera, es aquí donde puede tener un papel importante la LIS.



Figura 1: Producción y precio del Cobre 2003 – 2017, acumulado a abril para Chile y a marzo para el resto del mundo, además promedio del precio a mayo 201.

## 1.2.2. Lixiviación

La lixiviación se define como “proceso hidrometalúrgico mediante el cual se provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis. Este proceso se aplica a las rocas que contienen minerales oxidados y sulfurados, ya que éstos son fácilmente atacables por los ácidos y férricos, respectivamente” [6].

La lixiviación es parte de una cadena de procesos utilizados en minería para obtener cobre, esta etapa se ubica después de la explotación y la conminución de la roca mineralizada, las cuales requieren de una alta inversión económica.

Esta operación aplicada en óxidos de cobre se realiza utilizando una solución de ácido sulfúrico para que tenga contacto con el mineral y extraiga el metal deseado.

### 1.2.3. Lixiviación in situ

La LIS se define como “La circulación de un fluido a través de un depósito de mineral para disolver un metal o mineral objetivo, con posterior recuperación de la solución a la superficie para su procesamiento” [5]. En algunos casos la solución lixivante es aplicada mediante el uso de inyección y recuperación en los depósitos, mientras que en otros casos se aplica mediante rocío cuando la roca mineralizada ha sido previamente tratada para aumentar el área de transferencia. El primero se conoce como LIS en Green-field, mientras el segundo caso se conoce como minería in situ (o ISM de in situ mining) [7].

La LIS presenta ventajas frente a la lixiviación normal como, por ejemplo, posee un menor costo de operación debido a que no son necesarias las etapas previas de explotación, transporte y conminución de la roca mineralizada. Así mismo, puede ser utilizado en depósitos de mineral en donde no se puede realizar explotación por la baja ley de cobre, ubicación geológica (depósito muy profundo) y/o restricciones medioambientales que este puede presentar. En la actualidad este método de lixiviación es utilizado para la extracción del 48% del Uranio en el mundo [5][8]. Además, ha habido varios proyectos de lixiviación in situ de minerales de cobre, ejemplos claros de esto son San Manuel y Gunnison [5]. En la figura 2 se puede apreciar el funcionamiento de la minería mediante LIS.

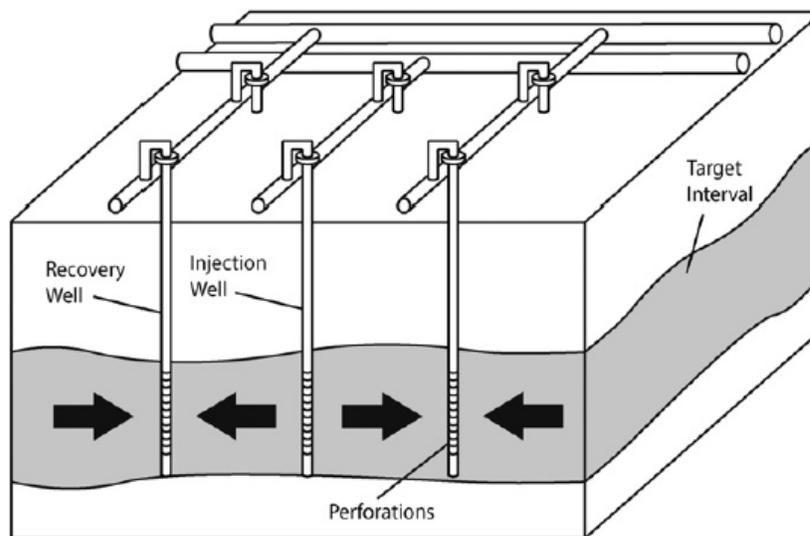


Figura 2: Diagrama de ejemplo de lixiviación in situ.

Comparando la lixiviación normal con la LIS, esta segunda requiere de parámetros más específicos del yacimiento que se busca procesar, tal como la permeabilidad del depósito mineral objetivo. Así mismo, este proceso puede demorar más tiempo al estar menos pre-procesada la roca mineralizada objetivo, dado que la solución debe permear hacia el mineral y luego extraer el metal mediante la reacción, esto puede tomar una mayor o menor cantidad de tiempo dependiendo de la distancia a la que se encuentre el mineral dentro de la ganga. Esto se explica mediante el modelo del núcleo sin reaccionar.

Existen más de una forma de aplicar LIS, la primera fue recién explicada, la segunda forma de aplicación se distingue como LIS con fracturamiento inducido por Block Caving, el que consiste en aprovechar el material hundido remanente en las minas de Block Caving para inyectar solución lixivianante y recuperar el remanente de mineral.

La tercera forma de implementar la LIS es mediante Stope Leaching, un método de explotación mediante caserones, el cual consiste en diseñar una unidad de explotación básica, cuyo objetivo es inyectar soluciones lixiviantes y recuperarlas mediante galerías de batea para su posterior procesamiento. Cabe destacar que la unidad se prepara para la recuperación mediante la tronadura del in situ contenido y removiendo parte del mineral que permita dejar espacio para el esponjamiento de las tronaduras siguientes, generando un aumento en la permeabilidad para facilitar el flujo de soluciones [9].

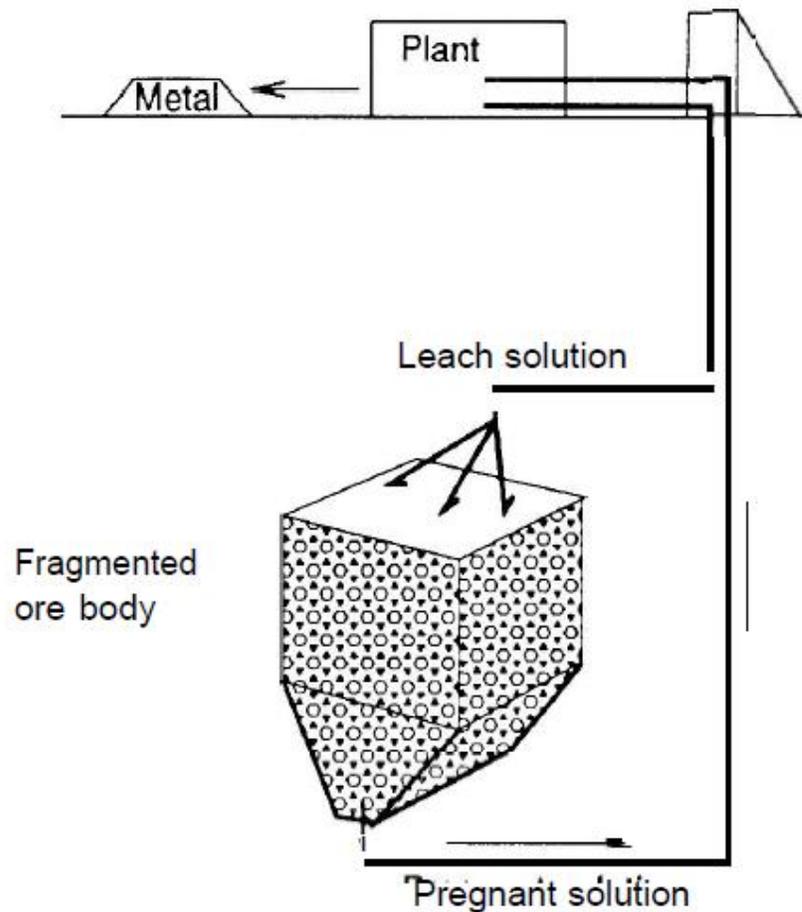


Figura 3: Diagrama de explotación de LIS mediante caserones (stope leaching).

#### 1.2.4. Modelo del núcleo sin reaccionar

El proceso de recuperación de un mineral mediante lixiviación posee un comportamiento parabólico, esto está relacionado con las etapas del mecanismo de lixiviación de una partícula de mineral o concentrado. Estas se enumeran a continuación:

1. El reactivo lixiviante difunde a través de la capa límite hacia la superficie de la partícula.
2. El reactivo lixiviante difunde en el interior de la partícula hasta la zona de reacción.
3. Ocurre la reacción química, se forman los productos de la reacción.
4. Los productos solubles de la reacción difunden en el interior de la partícula hacia la superficie de esta.
5. Los productos solubles difunden a través de la capa límite hacia el seno de la solución.

Estas etapas pueden observarse gráficamente en la figura 4:

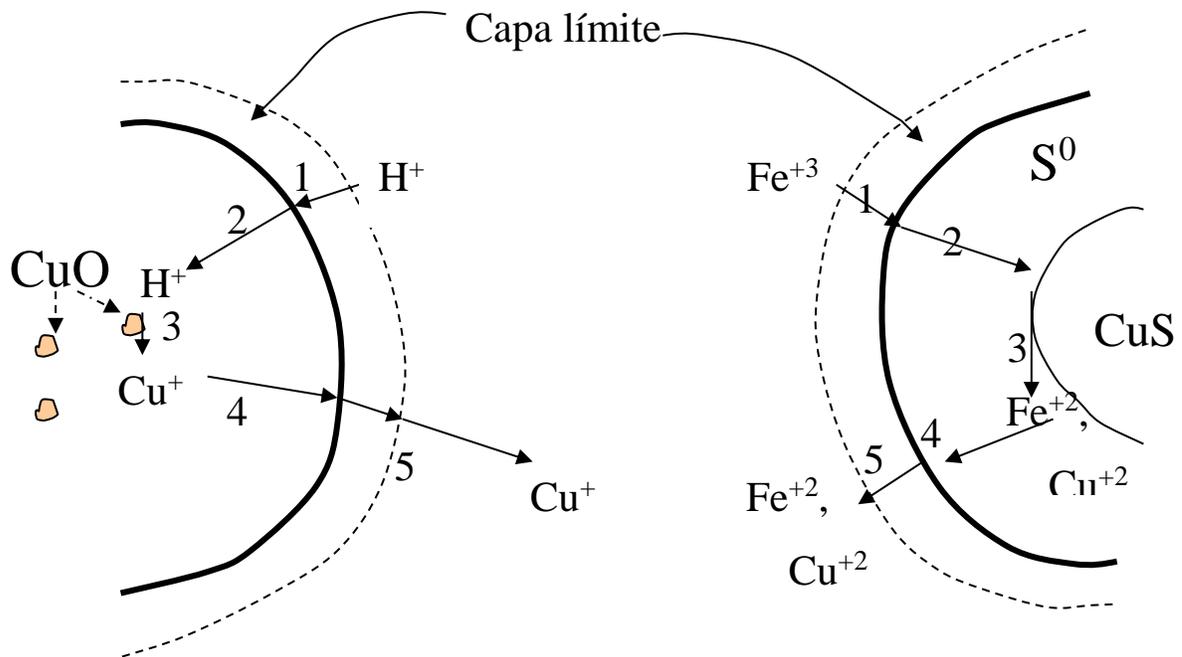


Figura 4: Diagrama de las etapas del mecanismo de lixiviación.

La velocidad de lixiviación es inicialmente alta, debido a que el reactivo ataca directamente a la especie de cobre objetivo presente en la superficie de la partícula, pero a medida que transcurre el tiempo la velocidad de lixiviación disminuye porque la superficie de reacción está cada vez más alejada de la superficie de la partícula, provocando que los reactivos y productos demoren más tiempo en desplazarse hacia el interior y exterior de la partícula, respectivamente [10]. En la figura 5 se puede observar el efecto de la disminución de la velocidad de lixiviación.

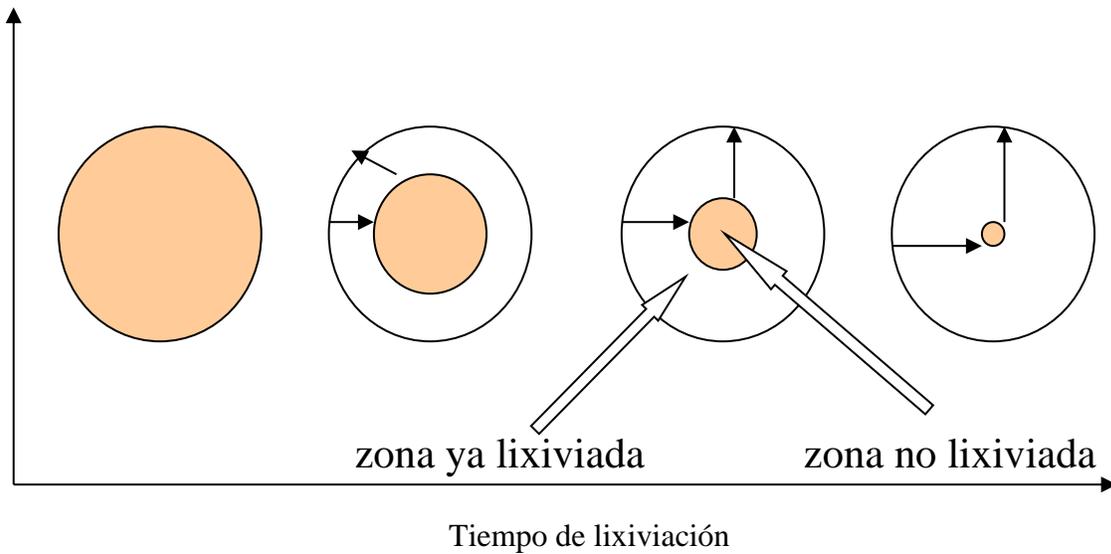


Figura 5: Diagrama explicativo de la disminución de la velocidad de lixiviación a través del tiempo.

Este mecanismo de reacción es el origen del comportamiento parabólico que se observa en la lixiviación. En la velocidad de lixiviación se observa que existen dos casos limitantes extremos, el caso en que la velocidad de reacción está controlada por la difusión del reactivo lixivante (etapa 2) y el caso en que la velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de reacción entre el lixivante y la especie mineral (etapa 3) [10].

La predominancia de la velocidad de reacción de una de estas dos etapas puede generar que la lixiviación in situ tenga un mayor o menor porcentaje de extracción del mineral objetivo, dependiendo del tiempo que se deje reaccionar la solución en el depósito mineral.

## 2. Objetivos y alcances

### 2.1. Objetivo general

Definir y planificar la operación de lixiviación en una planta de in situ mining (ISM) basada en la explotación por caserones.

### 2.2. Objetivos específicos

1. Definir la metodología para la caracterización experimental de la cinética de lixiviación de cobre y consumo de ácido del mineral a explotar.
2. Desarrollo de un modelo matemático para la predicción de la velocidad de lixiviación de cobre y el consumo de ácido en la lixiviación de caserones.
3. Aplicación del modelo matemático para la planificación de una operación de lixiviación in situ de caserones.

### 2.3. Alcances

Como se menciona anteriormente en la motivación, se pretende indagar en un primer acercamiento a la viabilidad de un proyecto minero de ISM. Es por esto que, al ser una primera aproximación, se plantea entregar una estrategia de diseño que sirva de guía para a futuro poder ser complementada con modelos y simulaciones, con el fin de obtener una estrategia más completa acorde a la realidad, con una menor cantidad de supuestos.

## 3. Estudios preliminares

De esta sección en adelante se presentan los factores que nos permitan definir y planificar la operación de lixiviación en una planta de in situ mining (ISM) basada en la explotación por caserones. Como se menciona anteriormente en los alcances, se recalca que este trabajo busca una primera aproximación, por lo que se asumen supuestos importantes que serán detallados en su sección correspondiente.

La planificación de la operación se realiza para un proyecto de minería in situ en el yacimiento llamado Quetena, cuyos aspectos primarios fueron abordado anteriormente en el trabajo de Javier Iriarte [11], y que será complementado con un análisis hidrometalúrgico para proponer un ritmo óptimo de la operación de lixiviación.

### 3.1. Curvas de recuperación de cobre

Las curvas de recuperación de cobre son una representación gráfica de la cinética de lixiviación que se genera en base a parámetros utilizados en la minería de lixiviación en pilas, específicamente, factores mineralógicos, granulométricos, calidad de soluciones y permeabilidad, entre otros.

La mejor forma de determinar la cinética de recuperación es experimentalmente, y es por esto que se utilizan curvas de recuperación obtenidas mediante un análisis de laboratorio realizado con anterioridad [11].

En base a este trabajo se busca obtener curvas cinéticas para otros diámetros de partícula mediante la utilización del modelo del núcleo sin reaccionar [10], específicamente para diámetros de partícula correspondientes a p80 de 6", 10", 15" y 18". Para esto se utiliza como referencia el gráfico de curvas cinéticas para p80 de 5,5" y 6", presentados en el trabajo de laboratorio ya realizado [11].

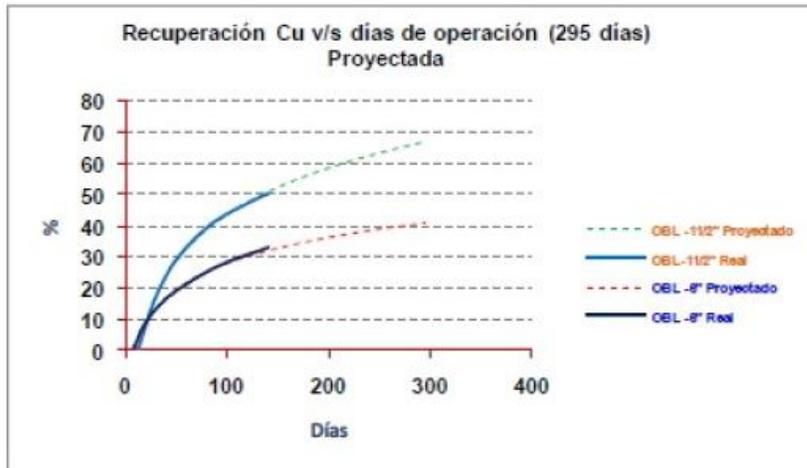


Figura 6: Gráfico de recuperación (%) vs Ciclo (días) [11].

Un depósito de minerales que se pretende explotar mediante el método de caserones simula un volumen de reacción en la cual ocurre la lixiviación. Además, se lixivía mediante la inyección de solución lixivante constantemente (hasta que se agota el caserón), lo que mantiene un contacto entre la solución y el mineral, aquí es donde entra la teoría del núcleo sin reaccionar, ya que este contacto constante genera la lixiviación total de las partículas y, por lo tanto, del depósito. Se destaca que la velocidad de lixiviación es menor cuando la etapa controlante de la cinética es la difusión dentro de la partícula, lo que le da gran importancia al tiempo que se mantiene la inyección y recuperación de los flujos de solución, es decir, su tiempo de residencia.

Para poder obtener las curvas cinéticas para p80 de 10", 15" y 18" se utiliza la teoría del núcleo sin reaccionar, específicamente la ecuación cuando la cinética de lixiviación es dominada por la difusión [10]:

$$\frac{t}{\tau} = \left[ 1 - 3(1 - x)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - x) \right] \quad (1)$$

Además, se tiene que el tiempo total de lixiviación ( $\tau$ ) aumenta linealmente con el cuadrado del diámetro de partículas:

$$\tau = kD^2 \quad (2)$$

Gracias a esto se pueden calcular de la siguiente forma las conversiones finales de los p80 de 10", 15" y 18" al paso de los 295 días de lixiviación.

A continuación, se presenta el cálculo del tiempo total de lixiviación y la conversión alcanzada para  $t = 295$  días.

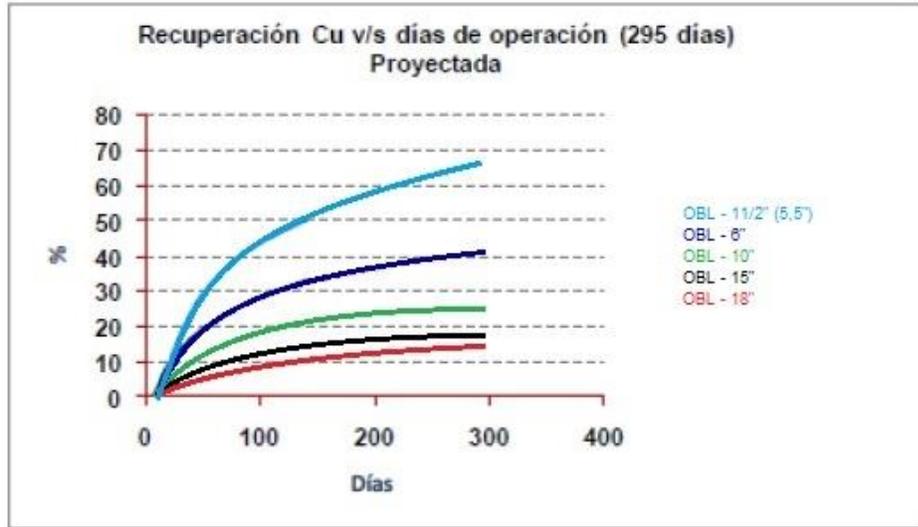


Figura 7: Gráfico de recuperación (%) vs Ciclo (días) con las curvas cinéticas de p80 10", 15" y 18" proyectadas.

Se observa de la Figura 7 que para  $t = 295$  días la recuperación alcanzada es de 42% aproximadamente, es decir,  $x=0,42$ . Luego calculamos el tiempo total de lixiviación para este caso:

$$\tau_1 = \frac{295 \text{ [días]}}{\left[1 - 3(1 - 0,42)^2 + 2(1 - 0,42)\right]} = \frac{295 \text{ [días]}}{[1 - 2,0864 + 1,16]} \quad (3)$$

$$\frac{295 \text{ [días]}}{[1 - 2,0864 + 1,16]} = \frac{295 \text{ [días]}}{0,0736} \quad (4)$$

$$\frac{295 \text{ [días]}}{0,0736} = 4.008,15 \text{ [días]} \quad (5)$$

Una vez obtenido el tiempo total de lixiviación, se utiliza la relación lineal entre  $\tau$  y el cuadrado del diámetro de partícula:

$$\tau_1 = kD_1^2 \quad (6)$$

$$\frac{\tau_1 = kD_1^2}{\tau_2 = kD_2^2} \quad (7)$$

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (8)$$

$$\tau_2 = \frac{\tau_1 D_2^2}{D_1^2} \quad (9)$$

Luego reemplazamos  $D_1^2 = 6''$ ,  $\tau_1 = 4.008,15$  [días] y, finalmente,  $D_2^2 = 10''$  (15'', 18'') para obtener el tiempo total de lixiviación para el tamaño de partícula deseado, y posteriormente, la recuperación que alcanza a los 295 días:

$$\tau_2(10'') = \frac{4.008,15 \text{ [días]} 100 \text{ ["}^2]}{36 \text{ ["}^2]} = 11.133,75 \text{ [días]} \quad (10)$$

$$\frac{t_2}{\tau_2} = 0,0265 = \left[ 1 - 3(1 - x_2)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - x_2) \right] \quad (11)$$

Esto se resuelve utilizando un solver y se obtiene la siguiente recuperación para  $t = 295$  [días]:

$$x_2 = 0,264 = 26,4 \text{ [%]} \quad (12)$$

Así mismo, se repite el cálculo para  $D_3^2 = 15''$  y  $D_4^2 = 18''$  análogamente y se obtienen los siguientes resultados:

$$\tau_3(15'') = 25.050,93 \text{ [días]} \quad (13)$$

$$x_3 = 0,1794 = 17,9 \text{ [%]} \quad (14)$$

$$\tau_4(18'') = 36.073,35 \text{ [días]} \quad (15)$$

$$x_4 = 0,1495 = 14,9 \text{ [%]} \quad (16)$$

Con estos resultados y considerando la misma forma de las curvas se pueden proyectar las curvas de recuperación vs ciclo de los p80 calculados.

Por otra parte, se necesita una proyección a mayor cantidad de tiempo para las curvas de recuperación, ya que en ISM la lixiviación de un caserón puede tardar desde días hasta meses, e incluso años. Es por esta razón que se utiliza nuevamente la teoría del núcleo sin reaccionar para proyectar curvas de recuperación de cobre para un tiempo de hasta 2200 días.

Para revisar con mayor detalle sobre el desarrollo de la proyección de estas curvas se puede ver el Anexo A, donde se expone el desarrollo paso a paso.

En la figura 8 se puede observar que a medida que aumenta el diámetro de partícula, menor es la recuperación de cobre al paso de los 2200 días. La curva de 6'' o menos llega a una recuperación aproximada de 66%, la curva de 10'' llega hasta un 43%, la curva de 15'' hasta 30% y la curva de 18'' hasta 25%, respectivamente.

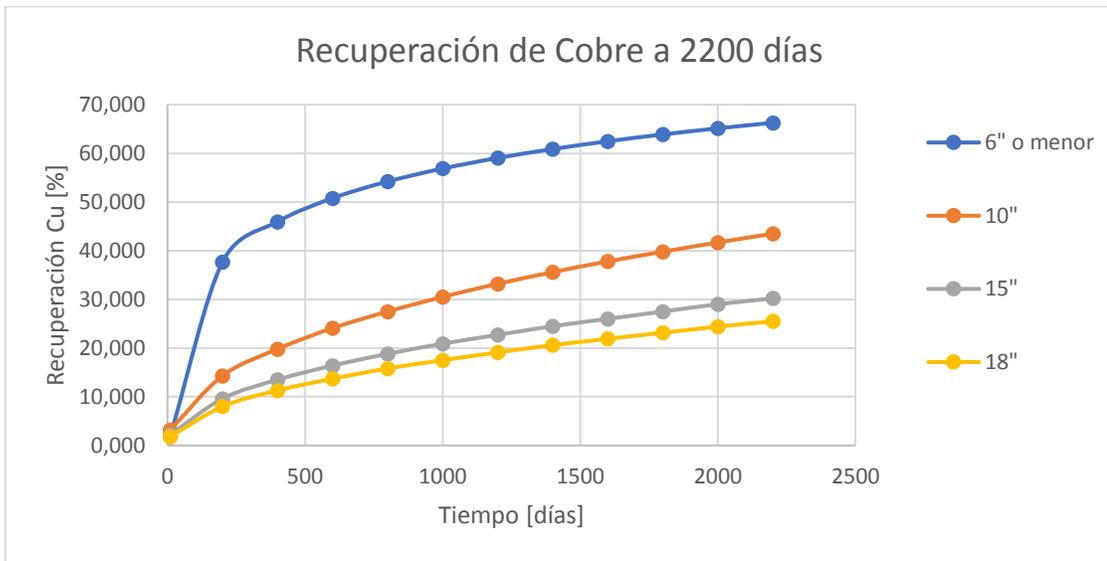


Figura 8: Curva cinética de recuperación de cobre hasta un tiempo de 2200 días.

Finalmente, para poder calcular hasta qué tiempo se debe lixiviar cada caserón se utiliza una estimación de que se debe lixiviar cada unidad básica de explotación hasta  $t = 676$  [días], que corresponden a lixiviar un total del 85% del cobre existente.

### 3.2.1. Razón de lixiviación

La razón de lixiviación se define como la cantidad de solución, en metros cúbicos, que humecta una tonelada de mineral. Sus unidades son  $\left[\frac{m^3}{ton}\right]$  y es una variable esencial debido a que determina la cantidad de solución que debe recibir la pila de lixiviación para obtener la cantidad de cobre objetivo.

$$RL \left[ \frac{m^3}{ton} \right] = \frac{TR \left[ \frac{L}{h \cdot m^2} \right] \cdot Ciclo [días] \cdot FR \left[ \frac{h}{días} \right]}{\rho_{ap} \left[ \frac{ton}{m^3} \right] \cdot H [m] \cdot 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right]} \quad (17)$$

Donde TR es la tasa de riego (flujo ingresado a cada módulo por metro cuadrado en riego), FR es la frecuencia de riego (tiempo diario de cada módulo expuesto a riego),  $\rho_{ap}$  es la densidad aparente del mineral y H es la altura de la pila.

La razón de lixiviación puede ser utilizada para generar gráficos de recuperación de cobre, los que pueden estar en función del ciclo (tiempo) o bien en función de la misma razón de lixiviación.

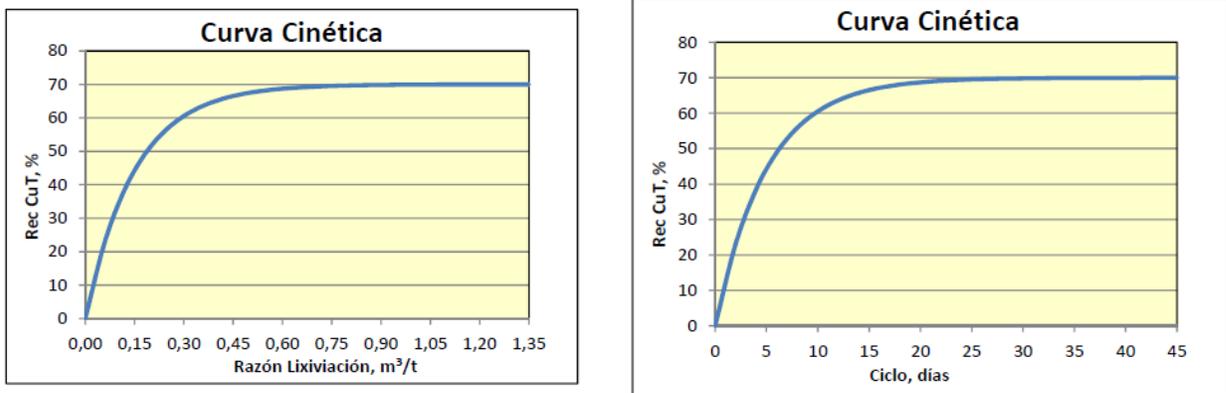


Figura 9: Curvas cinéticas de recuperación de cobre versus RL y de recuperación versus ciclo, respectivamente.

Si bien estas curvas de recuperación de cobre son realizadas experimentalmente para pilas de lixiviación, se considera que es útil para la estrategia de dimensionamiento de caserones ya que este se puede simular como una pila subterránea gracias al supuesto de que se trabaja en un régimen insaturado. El límite del flujo solución lixivante está dado por la humedad de saturación en las pilas de lixiviación, mientras que en ISM está dado por la permeabilidad resultante de la tronadura en el depósito, ya que no es posible inyectar más volumen de solución del que este permite.

## 4. Diseño del caserón

El diseño de caserones tiene por objetivo encontrar la configuración óptima, que busca maximizar la altura de este, siempre considerando su estabilidad y seguridad [12]. El proceso de decidir su configuración óptima se aborda en un trabajo previo realizado por Javier Iriarte, en el cual se elige entre las diferentes posibles configuraciones, con un enfoque importante en la seguridad [11].

El diseño óptimo elegido para estos depósitos minerales es de caserones tipo Long Hole Stopping, con extracción de pilares mediante técnica de recuperación de pilares y una inyección de soluciones desde la superficie. Las dimensiones de los caserones son 100 metros de altura, 80 metros de profundidad y 40 metros de ancho para los primarios, a diferencia de los caserones secundarios que poseen 60 metros de ancho, respectivamente. Finalmente, las bateas poseen un alto de 20 metros.

En la figura 10 se muestra el diseño de los caserones [11]. Cabe destacar que la imagen es sólo una referencia visual al diseño elegido debido a que la magnitud de la altura y la profundidad están intercambiadas para efectos de este trabajo.

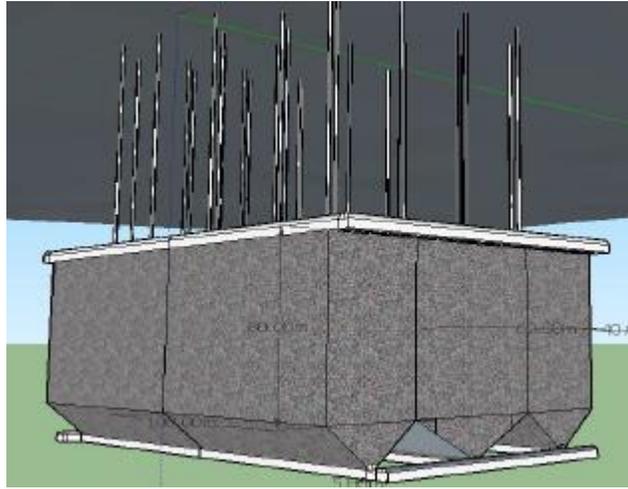


Figura 10: Diseño de ejemplo, vista isométrica [11].

## 4.1. Preparación de la cara libre del caserón

Existe una forma preferente de comenzar a realizar la cara libre para la preparación de caserones, esta es mediante Long Blast Hole (LBH). Este método consiste en perforar un pique de mayor diámetro (de 4,5" a 6,5") y con una longitud de hasta 80 metros. Esto generará una cara libre temporal más pequeña, para luego poder perforar y tronar con tiros cercanos al LBH, así se generará la cara libre necesaria para el caserón completo [13]. En la figura 11 y 12 se pueden observar un diagrama de ejemplo de LBH y su aplicación para el método de Long-Hole Stopping [14].

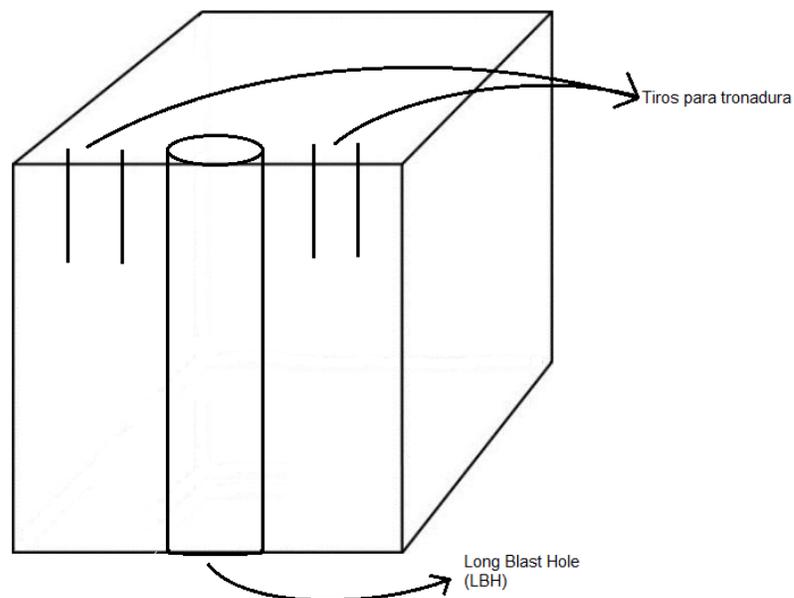


Figura 11: Diagrama de generación de cara libre en un caserón mediante LBH.

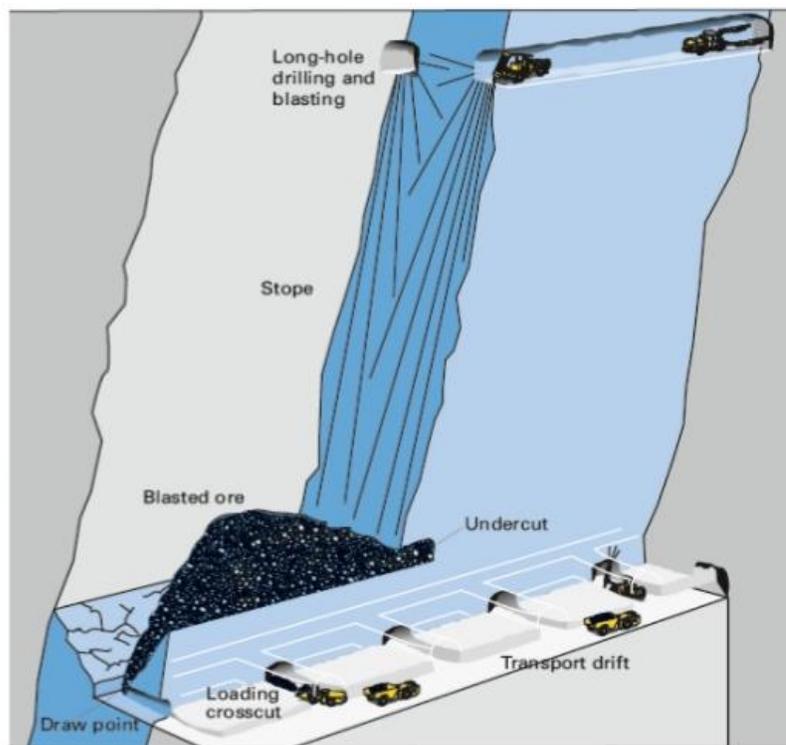


Figura 12: Método de Long-Hole Stopping, con perforación de Long blast holes para tronadura [14].

## 5. Cinéticas de lixiviación de cobre y de consumo de ácido del mineral

La concentración del ácido que se utilizará en la solución lixivante a irrigar en los caserones es un parámetro que influye directamente a los costos de operación ya que a mayor concentración que este vaya a tener en la solución, mayor serán los costos asociados a la utilización del ácido para la lixiviación. Así mismo, si se utiliza una menor concentración, esto traduce en menos costos operacionales.

### 5.1. Experimento realizado anteriormente

En su trabajo de tesis, Juan Urrutia realiza un experimento en laboratorio que consta de pruebas de lixiviación en iso-pH con el fin de analizar los efectos de la concentración de ácido en la lixiviación de cobre. [15], en la figura 13 se puede apreciar el montaje experimental realizado.



Figura 13: Montaje experimental de lixiviación de óxidos de cobre [15].

El montaje experimental está compuesto por un contenedor de aproximadamente 11 litros que contiene 1,1kg de mineral (entre 9/16 a 3/8 pulgadas) en un canastillo con perforaciones, inundado en 7,5 litros de solución ácida agitada por un agitador mecánico a 150 rpm. Además, cuenta con un medidor de pH para mantener constante la acidez de la solución. El tiempo total de cada prueba es de 225 horas (9,4 días).

La preparación de la solución lixivante se realiza de la siguiente manera: agua destilada y ácido sulfúrico, 8 litros de solución con una determinada concentración para cada prueba: 2, 3, 5, 10, 15 y 20 gramos por litro (gpl). Se reservan 500ml de respaldo para reponer pérdida de solución debido a muestras, evaporación y consumo. Se agrega constantemente ácido a la solución debido a que la lixiviación aumenta el pH inicial.

El registro de datos para las pruebas a diferentes concentraciones de ácido se realiza cada vez que se agrega ácido sulfúrico concentrado a la lo largo de la prueba y, al mismo tiempo en que se extraen 5ml de solución. Esta adición de ácido se debe al aumento del pH en la solución con respecto al inicial y se realiza mediante una bureta calibrada en mililitros. Las muestras tomadas se envían a análisis químico para análisis de concentración de cobre en ppm, se destaca que las muestras se corrigen por volumen extraído.[15]

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, en función al montaje experimental detallado:

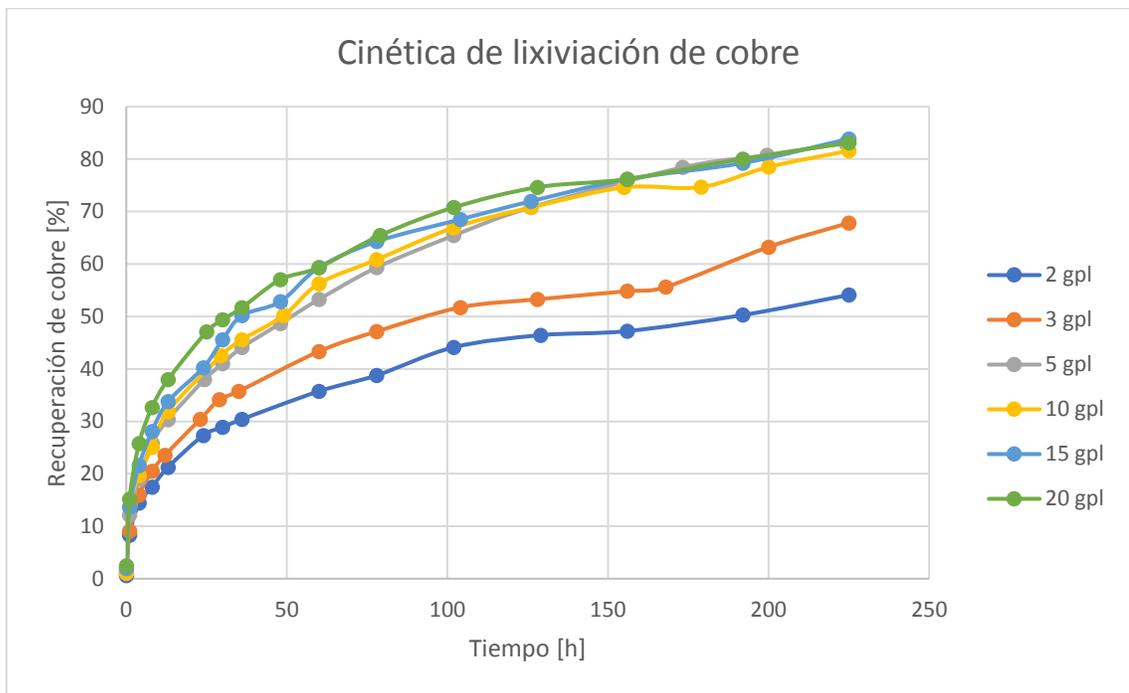


Figura 14: Cinética de lixiviación de cobre para diferentes concentraciones de ácido en la solución lixiviante [15].

Como se puede apreciar en la figura 14, la cinética de lixiviación de cobre muestra que la prueba realizada con 5 [gpl] de concentración de ácido entrega un resultado semejante a las de mayor concentración, aproximadamente un valor de 83 [%] de recuperación de cobre.

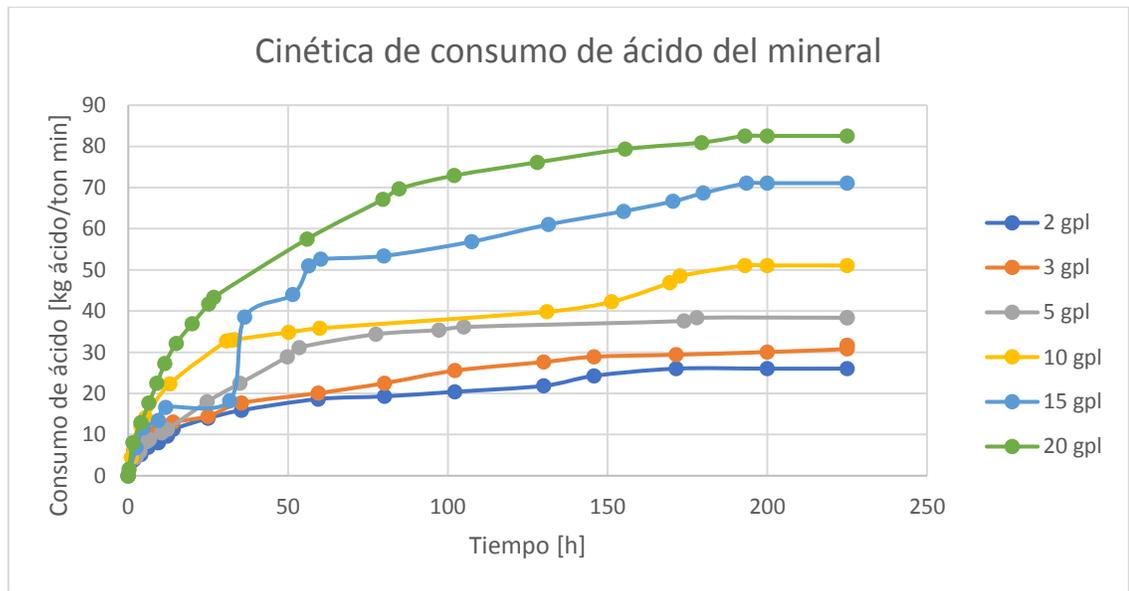


Figura 15: Consumo de ácido en el tiempo para diferentes concentraciones de solución lixiviante [15].

Como se puede observar en la figura 15, la cinética de consumo de ácido del mineral entrega como resultado que mientras mayor es la concentración de solución lixiviante, mayor es el consumo de ácido

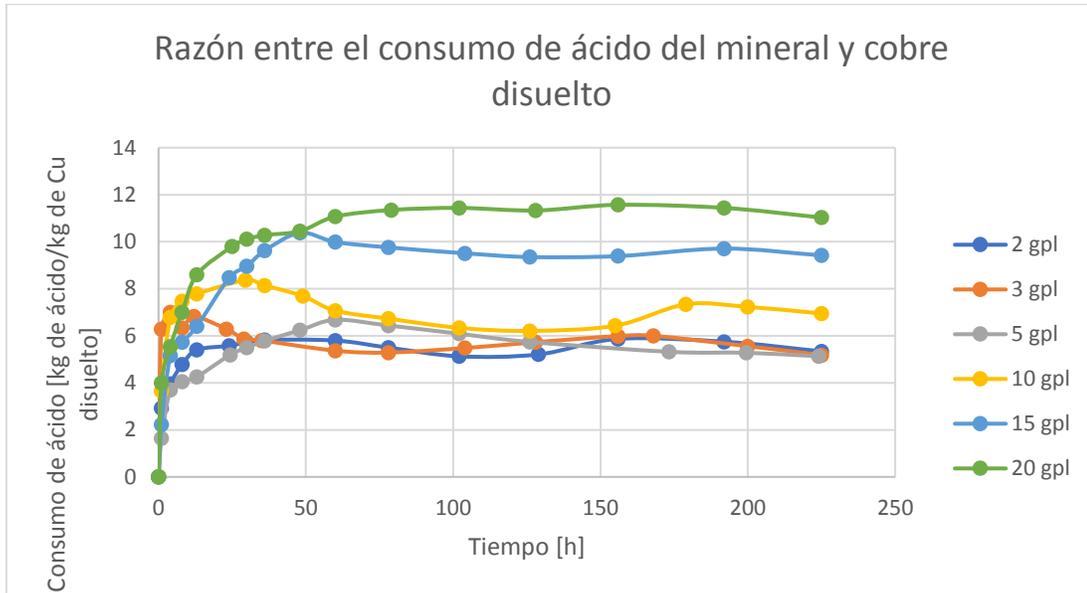


Figura 16: Razón entre el consumo de ácido en la solución lixivante y el cobre disuelto que es capaz de extraerse [15].

Como se observa en la figura 16, la razón entre consumo de ácido del mineral y el cobre disuelto en solución muestra que al utilizar una concentración mayor a 5 [gpl] aumenta el consumo, lo que se traduce en un mayor costo de ácido por kilo de cobre producido

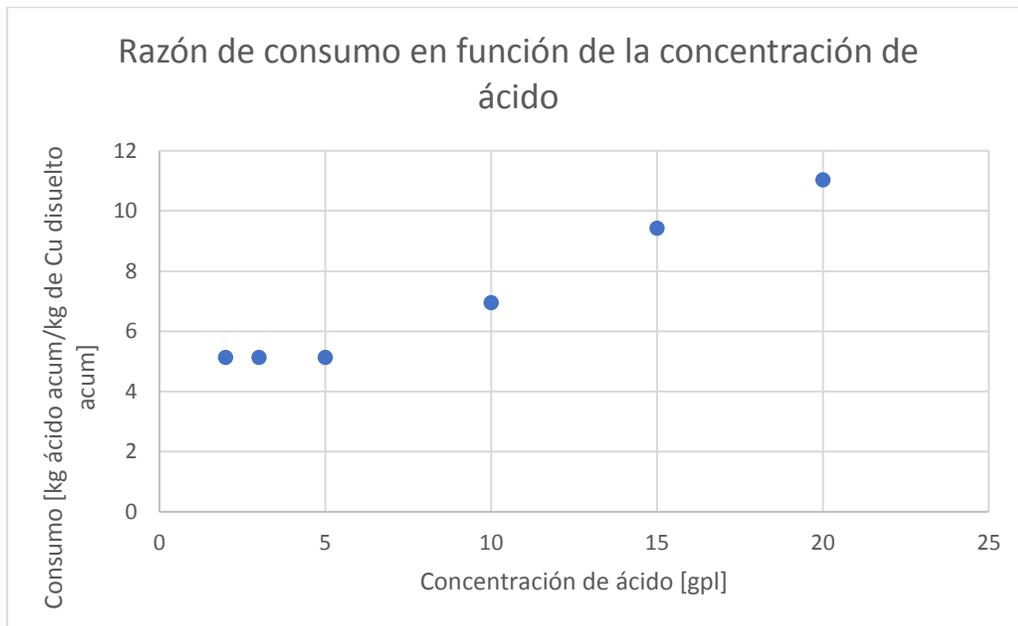


Figura 17: Razón entre el consumo de ácido del mineral acumulado y el cobre disuelto acumulado frente a la concentración de ácido en la solución lixivante. [15]

Como se aprecia en la figura 17, la razón entre el consumo de ácido del mineral acumulado y el cobre disuelto acumulado en función de la concentración de ácido de la solución lixivante entrega

que por sobre los 5 [gpl] existe un aumento lineal en el consumo, sin un aumento en la recuperación de cobre.

## 5.2 Caracterización de la cinética de lixiviación de cobre

Tomando como base las pruebas realizadas anteriormente, se procederá a realizar una caracterización matemática de la cinética de lixiviación de cobre y la de consumo de ácido. El fin de esta caracterización corresponde a poder extrapolar estos resultados a diferentes diámetros de partícula y diferentes concentraciones de ácido, respectivamente.

En base a los gráficos expuestos anteriormente, se utilizan los datos y la ecuación (3) para obtener un valor de tiempo total de lixiviación ( $\tau$ ) en función del diámetro de partícula ( $D$ ).

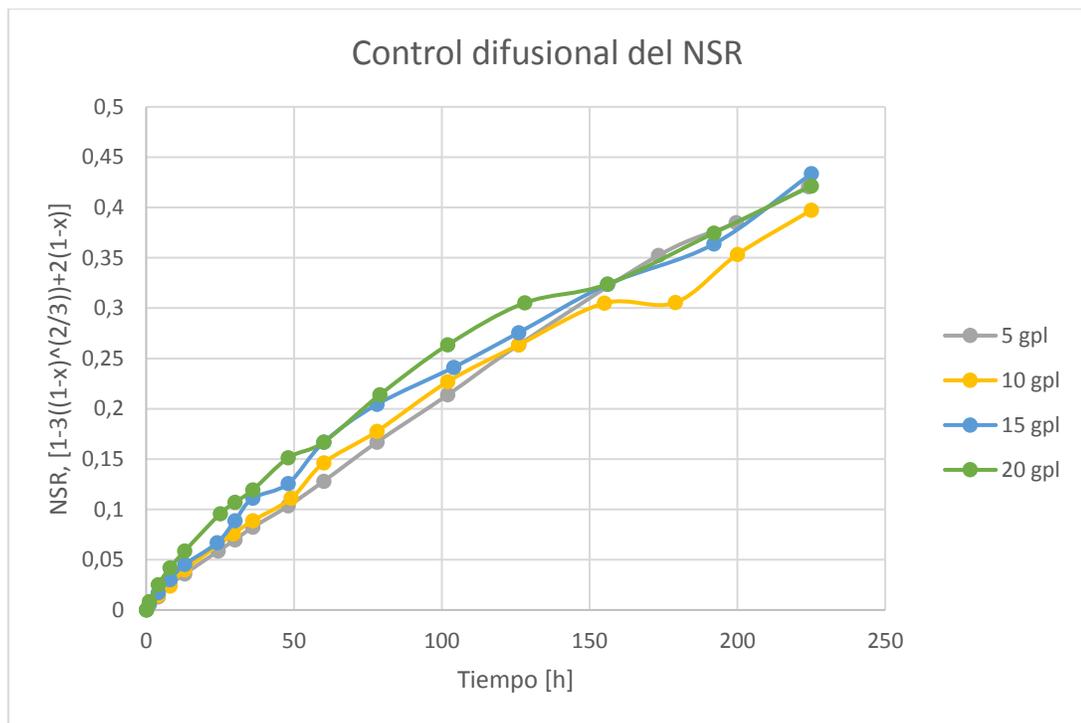


Figura 18: Modelo del N.S.R. controlado por la difusión. [15]

Se toman las curvas de concentración de ácido mayores o igual a 5 [gpl], ya que como se observa en la figura 18, a partir de esta concentración en adelante la recuperación tiene iguales resultados, y se grafica una curva con todas juntas, luego se busca una tendencia en los datos y se procede a calcular la constante  $k$ .

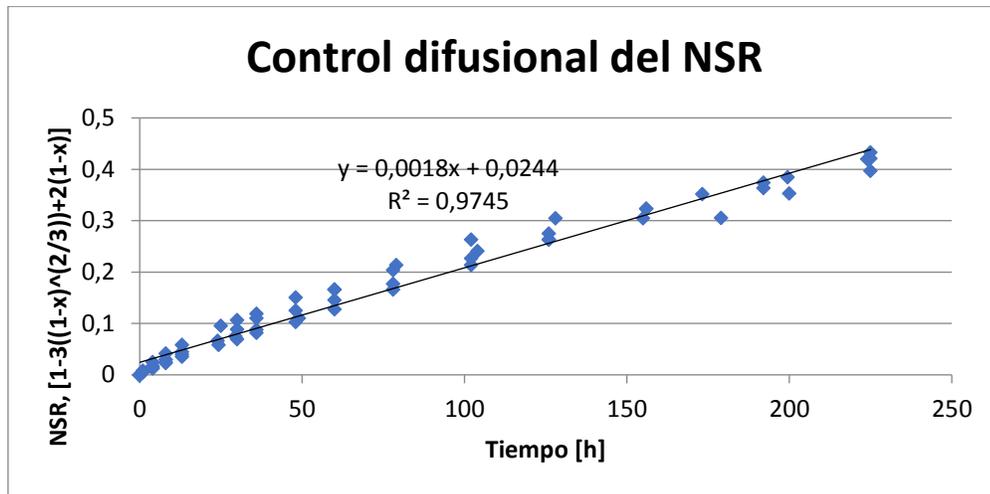


Figura 19: Modelo del N.S.R. controlado por la difusión para concentraciones mayores a 5 [gpl].

En base a la figura 19, se observa que la ecuación que describe la tendencia del modelo del N.S.R. controlado por la difusión corresponde a:

$$y = 0,0018x + 0,0244 \quad (18)$$

Observándose que la pendiente de la curva de tendencia corresponde a  $m = 0,0018$ .

Con esto se despeja el tiempo total de lixiviación para este caso de estudio, correspondiente a partículas de diámetro promedio de 1,9 [cm] [15]:

$$\frac{t}{\tau} = [1 - 3 \cdot (1 - x)^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot (1 - x)] \quad (19)$$

$$\frac{t}{[1 - 3 \cdot (1 - x)^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot (1 - x)]} = \tau \quad (20)$$

$$\frac{1 [h]}{0,0018} = 555,6 [h] \quad (21)$$

Utilizando la ecuación (3) se puede calcular la constante k:

$$\tau = k \cdot D^2 \quad (22)$$

$$k = \frac{\tau}{D^2} \quad (23)$$

$$k = \frac{555,6 [h]}{(1,9)^2 [cm^2]} \quad (24)$$

$$k = 153,9 \left[ \frac{h}{cm^2} \right] \quad (25)$$

Con esta constante  $k$  es posible calcular el tiempo total de lixiviación ( $\tau$  [h]) para cualquier diámetro de partícula ( $D$  [cm]) que se desee.

De esta forma calculamos  $\tau$  para partículas con 6" de diámetro (15,24 [cm]):

$$\tau [h] = k \cdot D^2 [cm^2] \quad (26)$$

$$\tau = 153,9 \cdot (15,24)^2 \quad (27)$$

$$\tau = 35.744,4 [h] \quad (28)$$

### 5.3. Caracterización de la cinética de consumo de ácido del mineral

Como se puede observar de la figura 17, el consumo presenta un comportamiento lineal a partir de una concentración de 5 [gpl] en adelante, por lo que para realizar la caracterización matemática del consumo de ácido del mineral se pretende tomar los datos de dicha figura a partir de la concentración nombrada para poder obtener la ecuación que describe este comportamiento lineal y así, extrapolar este consumo para cualquier concentración de ácido superior a los 5 [gpl].

A continuación, se presenta el ajuste realizado para las concentraciones a partir de 5 [gpl] presentadas anteriormente.

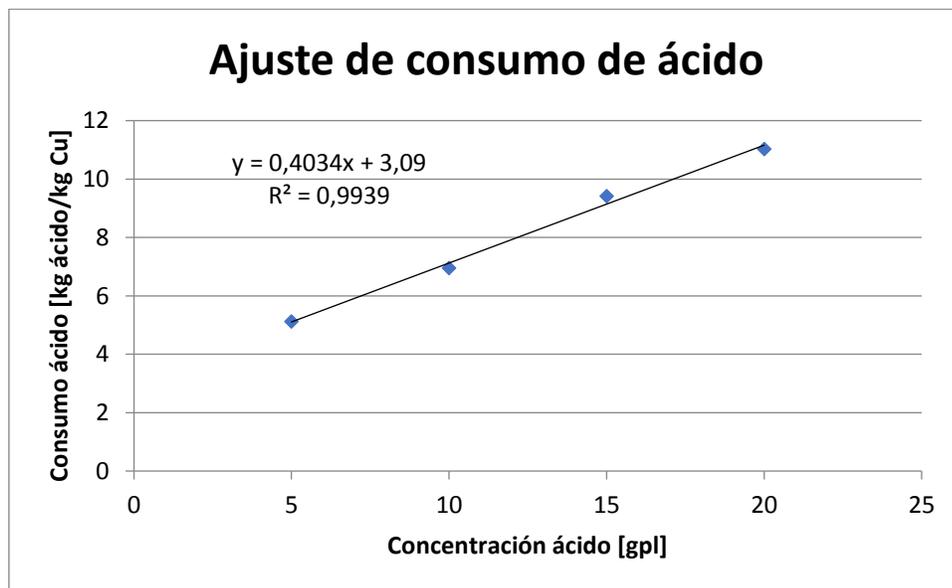


Figura 20: Consumo de ácido para cada concentración de ácido superior a 5[gpl].

Como se puede apreciar en la figura 20, se obtiene la ecuación que describe el comportamiento lineal del consumo de ácido del mineral en función de la concentración de ácido:

$$y = 0,4034 \cdot x + 3,09 \quad (29)$$

Se recalca que esta ecuación se puede utilizar para concentraciones de ácido mayores o iguales a 5[gpl], ya que para concentraciones menores el consumo no varía como se puede apreciar en la figura 17.

Con esta ecuación se pueden obtener los consumos de ácido del mineral para cualquier concentración de ácido mayores o iguales a 5 [gpl]. A continuación, se realizará el cálculo para diferentes concentraciones de ácido que corresponden a 50, 30 y 10 [gpl], respectivamente:

$$\text{Consumo}_{50[\text{gpl}]} = 0,4034 \cdot 50[\text{gpl}] + 3,09 \quad (30)$$

$$\text{Consumo}_{50[\text{gpl}]} = 23,26 \left[ \frac{\text{kg ácido}}{\text{kg Cu}} \right] \quad (31)$$

$$\text{Consumo}_{30[\text{gpl}]} = 0,4034 \cdot 30[\text{gpl}] + 3,09 \quad (32)$$

$$\text{Consumo}_{30[\text{gpl}]} = 15,2 \left[ \frac{\text{kg ácido}}{\text{kg Cu}} \right] \quad (33)$$

$$\text{Consumo}_{10[\text{gpl}]} = 0,4034 \cdot 10[\text{gpl}] + 3,09 \quad (34)$$

$$\text{Consumo}_{10[\text{gpl}]} = 7,12 \left[ \frac{\text{kg ácido}}{\text{kg Cu}} \right] \quad (35)$$

Como se puede apreciar en los ejemplos, la expresión matemática de la cinética de consumo de ácido del mineral en función de la concentración de ácido generada permite extrapolar valores de consumo en función de concentraciones mayores o iguales a 5[gpl], basado en los experimentos nombrados realizados con anterioridad [15].

## 6. Simulación de lixiviación in situ

En este capítulo se presenta una simulación de lixiviación de caserones en base a un modelo que describe la recuperación de cobre a través de la fenomenología existente en las reacciones de lixiviación y del consumo de ácido por parte del mineral oxidado.

### 6.1. Modelo de lixiviación in situ

El modelo considera la lixiviación por metro cuadrado de un pilar del caserón. Es decir, los resultados obtenidos de la simulación corresponden valores por unidad de área, para los caserones.

Los elementos básicos para la elaboración de un modelo son las ecuaciones que lo componen. En este caso se utilizan las siguientes ecuaciones: balance de masa, las ecuaciones que describen la fenomenología de la reacción ocurrida, que en este caso corresponde a la lixiviación de mineral oxidado para el cual se utiliza el modelo de núcleo sin reaccionar (N.S.R.) y, además, se utiliza una ecuación de consumo de ácido en función del cobre recuperado la cual fue calculada en la sección 5.3.3.

Se asume una subdivisión del pilar a lixiviar como un conjunto de 100 volúmenes en serie, emulando una configuración de reactores CSTR en serie. Cabe destacar que para que se considere un reactor CSTR se requiere el supuesto de que existe una concentración homogénea dentro de este, además esta concentración corresponde a la misma que la salida del reactor. En la figura 21 se presenta un esquema de lo descrito:

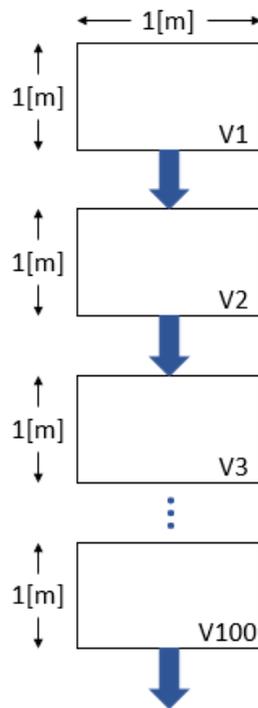


Figura 21: Diagrama de 100 volúmenes en serie, emulando una configuración CSTR en serie.

En cada uno de estos volúmenes se calcula la concentración de cobre recuperado en función del modelo del N.S.R. y, además, la concentración de ácido de salida en función del consumo del ácido entrante y la recuperación de cobre del bloque. Es decir, inicialmente se ingresa una cierta concentración de ácido al primer volumen y a la salida se calcula la concentración de cobre recuperado y la concentración del ácido restante, esto se itera para todos los bloques siguientes hasta alcanzar la salida del volumen número 100, que corresponde al final del caserón.

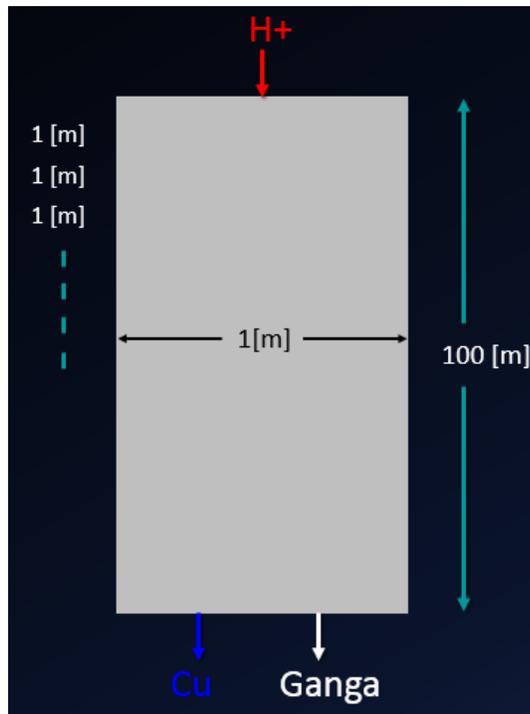


Figura 22: Diagrama de flujo general (caja negra) del modelo.

El programa que realiza la simulación entrega resultados gráficos. Un primer gráfico consiste en mostrar la concentración de cobre y la concentración del ácido a través de la altura del conjunto de volúmenes que componen el pilar del caserón. Éste muestra cómo aumenta la concentración de cobre y cómo disminuye la concentración de ácido a través de que se avanza a través de los bloques. Un segundo resultado gráfico muestra lo obtenido al final de la serie de bloques a través del tiempo, es decir, lo que se obtiene al final del caserón para todo el tiempo de simulación, que es la concentración de cobre y la concentración de ácido a la salida. Finalmente, un tercer gráfico muestra la recuperación total de cobre en porcentaje con respecto al tiempo de simulación. El código del programa se puede ver en detalle en el Anexo C.

## 6.2. Condiciones y parámetros utilizados

En la simulación realizada se utilizan parámetros y variables que sirven de input para el programa computacional, estos pueden ser modificados para futuros análisis en función del yacimiento que se pretenda simular.

Los parámetros usados son los siguientes:

- Se utiliza una constante  $k$  de valor  $153,9 \left[ \frac{h}{cm^2} \right]$ , calculada en la sección 5.3.2. para calcular el tiempo total de lixiviación correspondiente al diámetro de partícula a simular.
- Se utiliza un tiempo de simulación correspondiente a 40.000 [horas], esto es equivalente a 1.666,7 [días].
- La humedad retenida en el mineral se estima en 15%.

- Como me menciona anteriormente, los resultados del modelo son por unidad de área, por lo tanto, el área de simulación es  $A = 1 [m^2]$ .
- Se utiliza una tasa de riego correspondiente a  $TR = 8 \left[ \frac{L}{h \cdot m^2} \right]$ .
- La densidad aparente del mineral es  $d = 1,7 \left[ \frac{ton}{m^3} \right]$ .
- La ley de cobre inicial en el mineral es 0,9%.
- Se utiliza la función de consumo de ácido siguiente:  $y = 0,4034 \cdot x + 3,09$

Las variables de la simulación son las siguientes:

- Diámetro de partícula  $D = 6", 8" \text{ y } 10"$ .
- Concentración de ácido: 50, 30 y 10  $\left[ \frac{g}{L} \right]$ .

Estas variables fueron escogidas debido a que son las consideradas más importantes de analizar con respecto al ritmo de producción de los caserones.

### 6.3. Resultados de la simulación

A continuación, se presentan los resultados de la simulación realizada, se expone primero el caso en que la concentración de ácido inicial es 10 [g/L] para partículas de 6 pulgadas. Cabe destacar que las curvas de color azul corresponden a la concentración de cobre (ordenada izquierda) y las curvas de color rojo corresponden a la concentración de ácido (ordenada derecha).

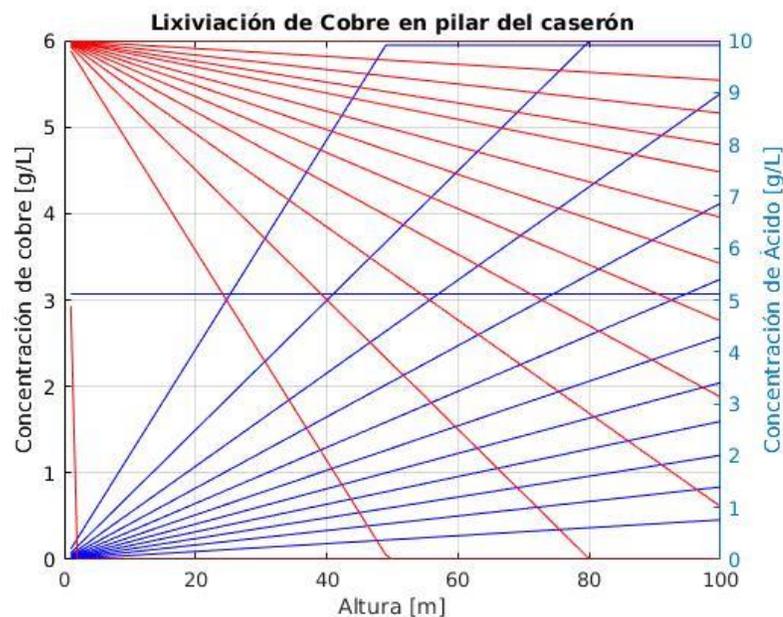


Figura 23: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 6 pulgadas.

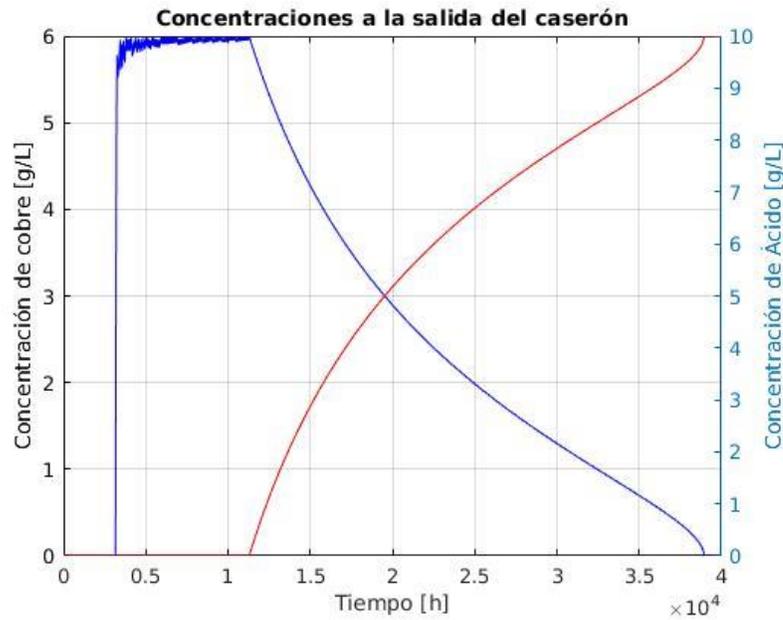


Figura 24: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 6 pulgadas.

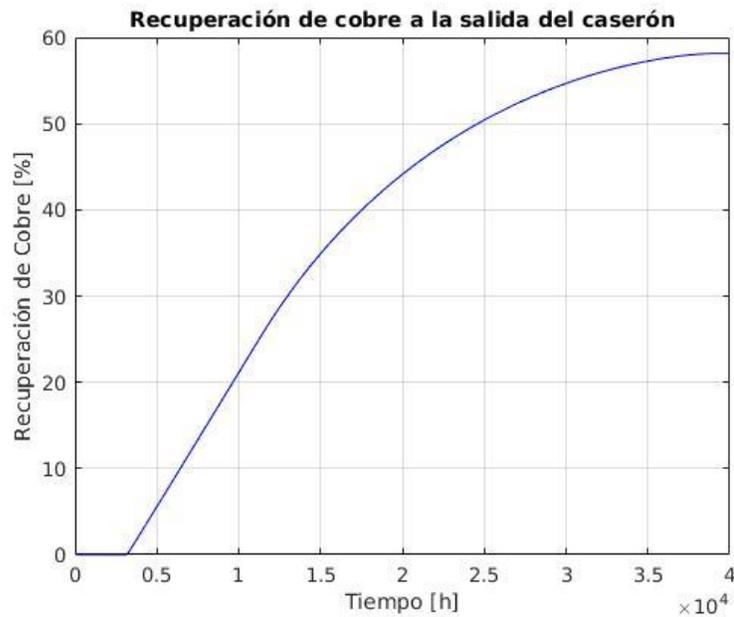


Figura 25: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 10[gpl] y partículas de 6 pulgadas.

Se observa en la figura 23 que en una primera inyección de solución lixivante se agota el ácido dentro de los primeros metros del caserón, pero a medida que pasa el tiempo el ácido percola a través de más volúmenes y recupera una mayor concentración de cobre. En la figura 24 se observa que la concentración de cobre a la salida se establece en torno a los 6 [g/L] para luego decrecer paulatinamente hasta llegar a cero. Por otra parte, la concentración de ácido se mantiene nula inicialmente y luego comienza a crecer en el momento que la concentración de cobre disminuye, el ácido aumenta hasta llegar a su concentración inicial en el mismo momento en que la

recuperación de cobre es nula. En la figura 25 se puede observar que la recuperación global de cobre a través de 40.000 [horas] corresponde a un total de 58% aproximadamente.

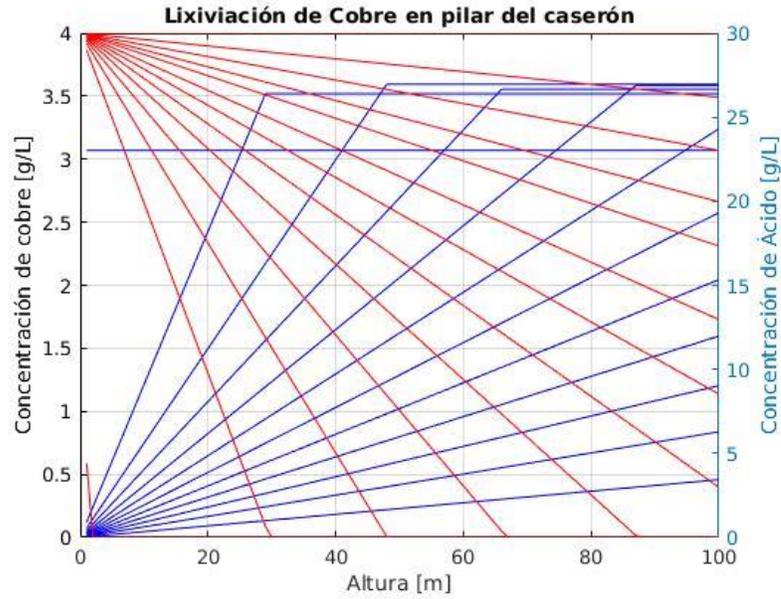


Figura 26: Concentraciones de cobre y ácido (30[gp/l]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 6 pulgadas.

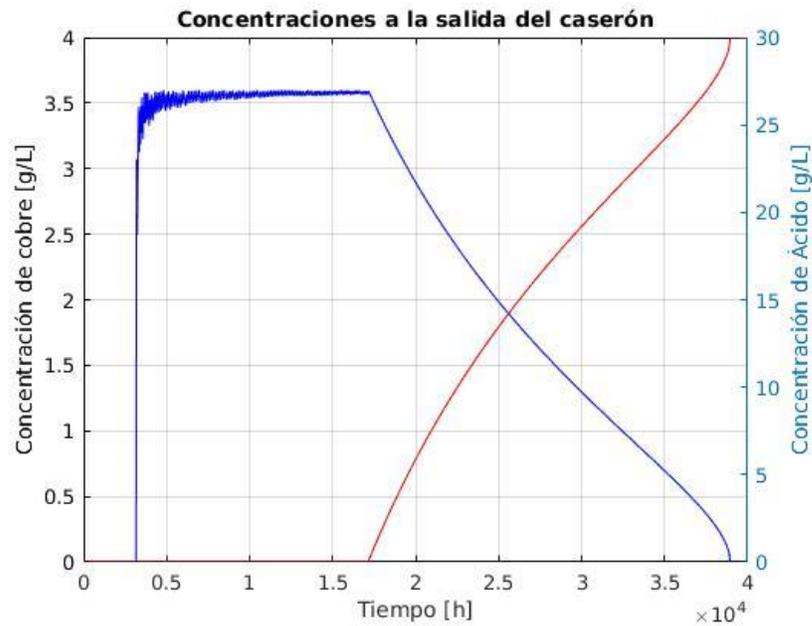


Figura 27: Concentraciones de cobre y ácido (30[gp/l]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 6 pulgadas.

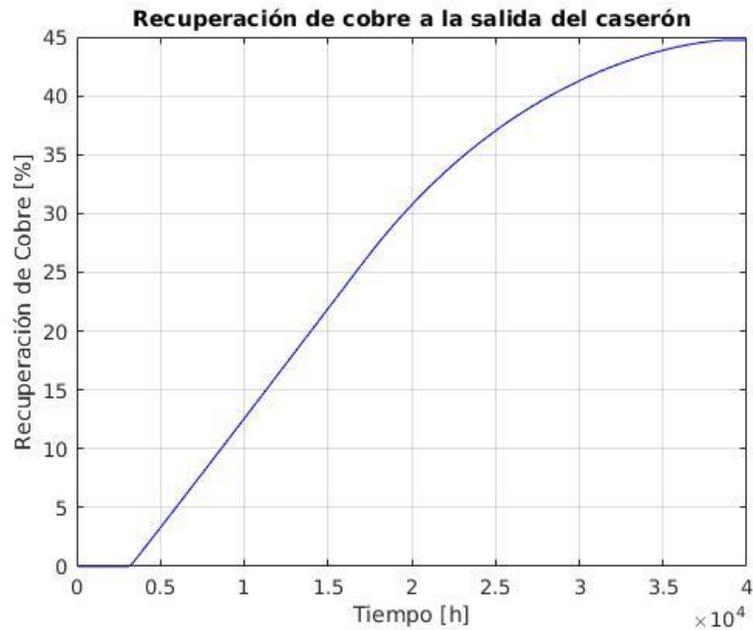


Figura 28: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 30[gpl] y partículas de 6 pulgadas.

En las figuras 26 y 27 se observa que las concentraciones de cobre y ácido muestran un comportamiento similar a las curvas de 10[gpl], con la diferencia de que la concentración de cobre se establece en torno a los 3,6[g/L] y por un mayor tiempo antes de comenzar a decaer. En la figura 28 se observa una recuperación global de cobre en torno a los 45%.

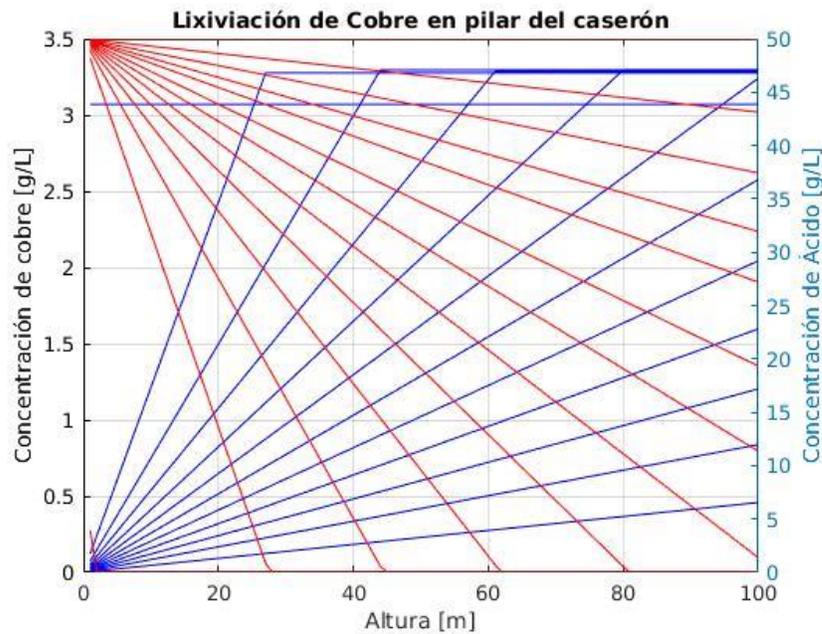


Figura 29: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 6 pulgadas.

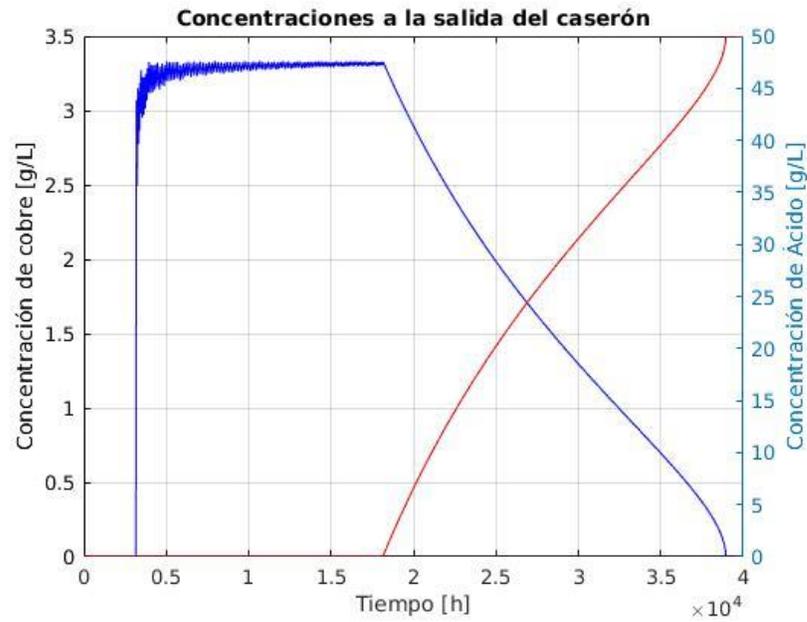


Figura 30: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 6 pulgadas.

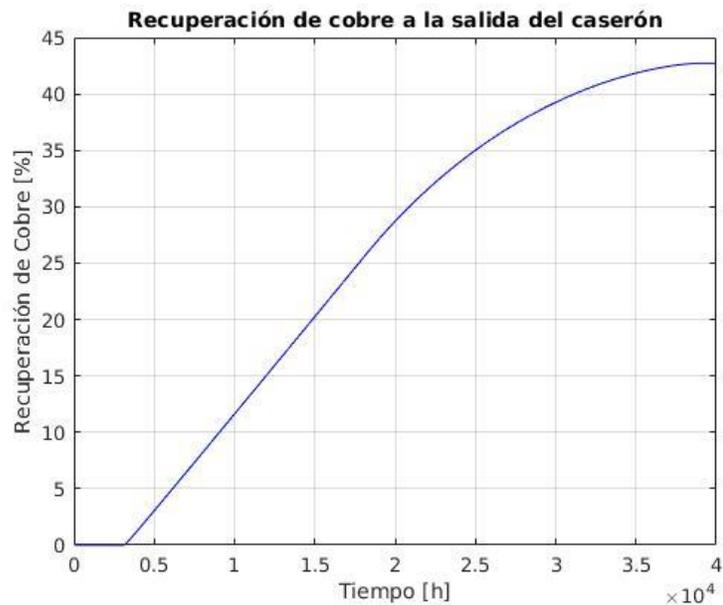


Figura 31: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 50[gpl] y partículas de 6 pulgadas.

Se observa en las figuras 29 y 30 que la concentración de cobre se establece en torno a los 3,3[g/L] por un tiempo similar a la concentración de 30[gpl], pero como se puede apreciar en la figura 31, la recuperación global de cobre llega a un total de 43%, lo que es causado por el consumo de ácido del mineral, ya que la reacción con la ganga aumenta si se tiene una mayor concentración de ácido.

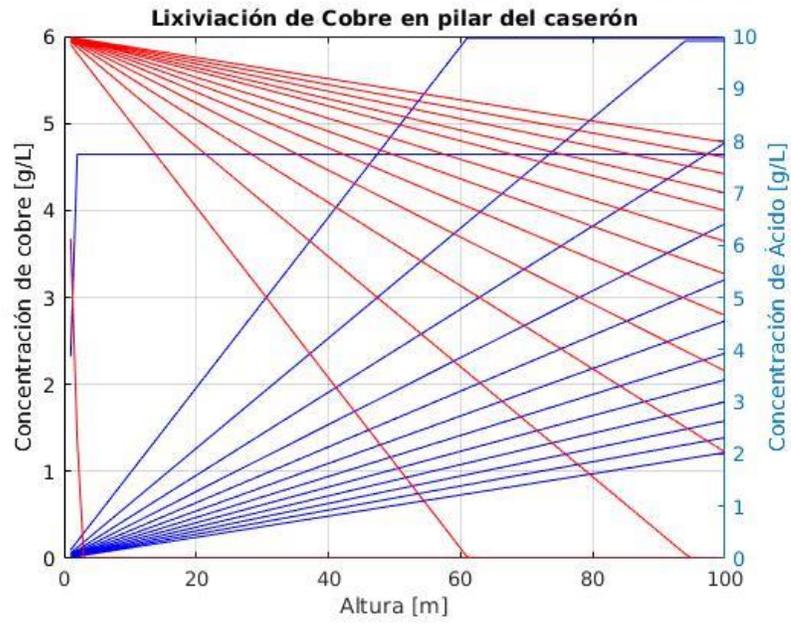


Figura 32: Concentraciones de cobre y ácido (10[gp/l]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 8 pulgadas.

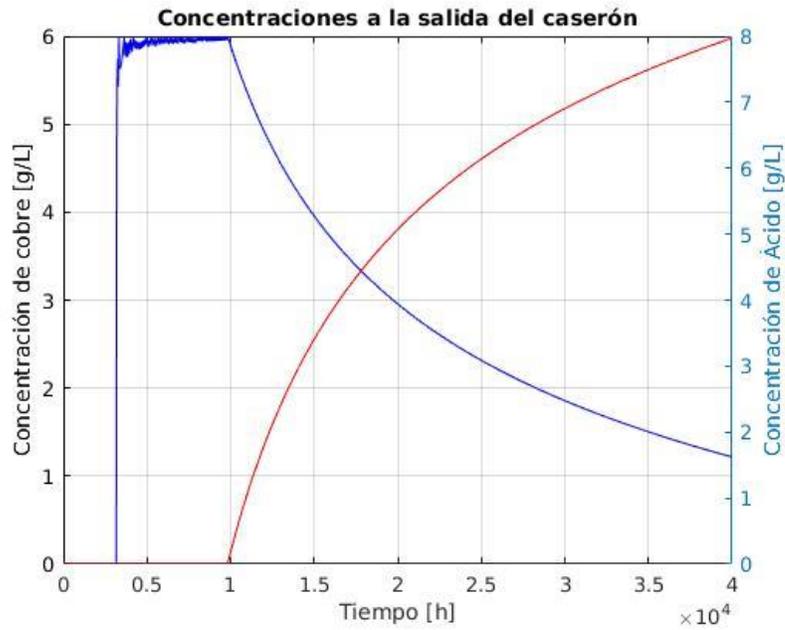


Figura 33: Concentraciones de cobre y ácido (10[gp/l]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 8 pulgadas.

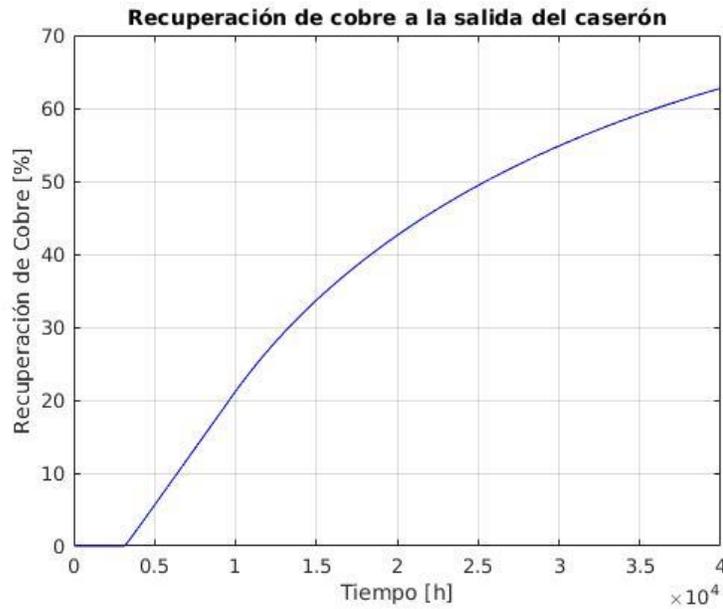


Figura 34: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 10[gpl] y partículas de 8 pulgadas.

Se observa en la figura 32 que para partículas de 8 pulgadas el ácido logra percolar más profundo para mismos tiempos en comparación con partículas menores, esto se puede deber a una menor área de contacto con el mineral y, por lo tanto, una menor reacción entre el ácido y el mineral. En la figura 33 se observa que la concentración de cobre se establece en torno a los 6[g/L] para luego decrecer paulatinamente hasta un valor aproximado de 1,5[g/L]. Por otra parte, el ácido se mantiene nulo hasta que comienza a aumentar a través de tiempo hasta llegar a 8[g/L]. En la figura 34 se observa que la recuperación global de cobre alcanza los 62% aproximadamente.

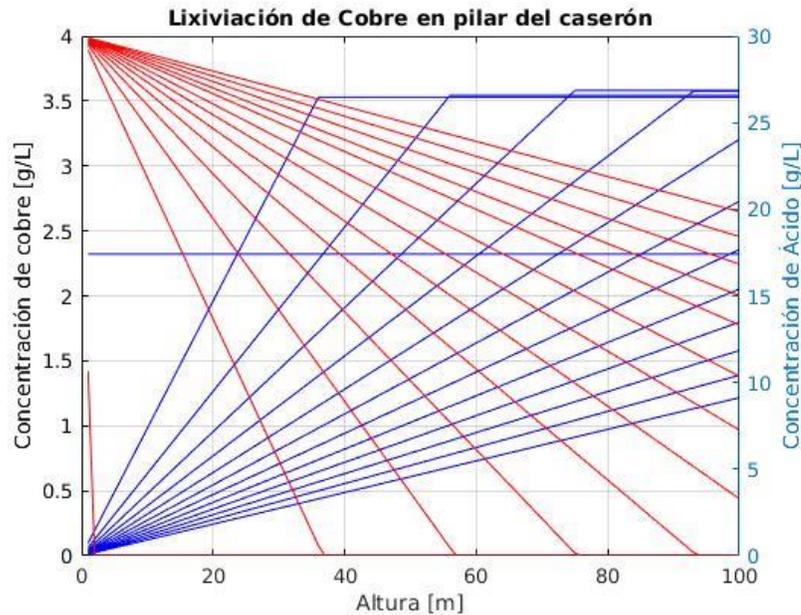


Figura 35: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 8 pulgadas.

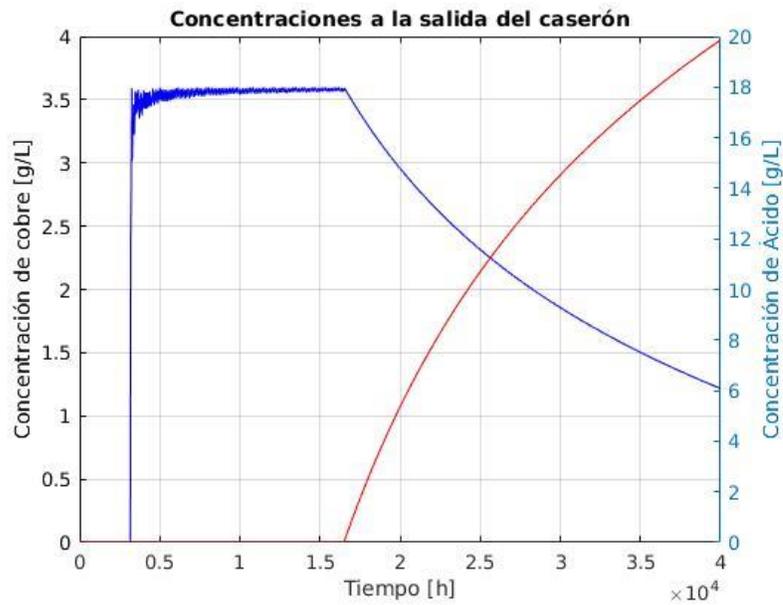


Figura 36: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 8 pulgadas.

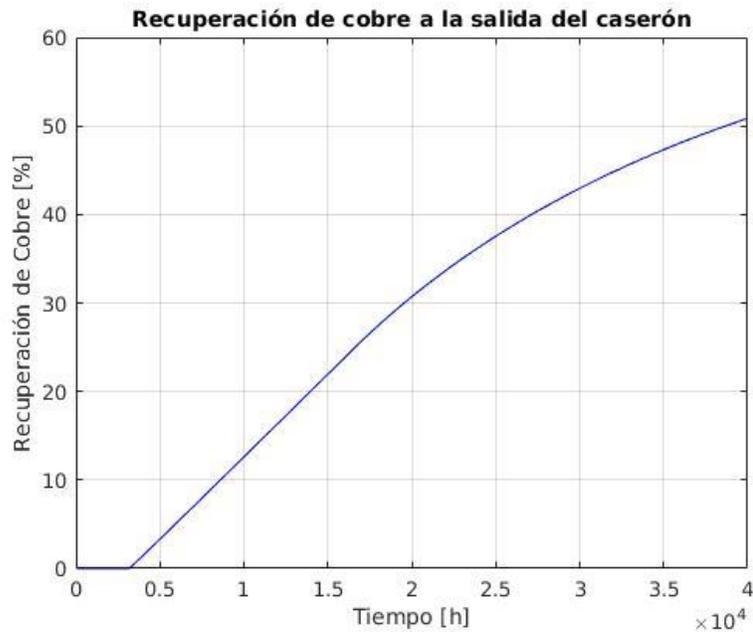


Figura 37: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 30[gpl] y partículas de 8 pulgadas.

Se observa en las figuras 35 y 36 que la concentración de cobre se establece en torno a los 3,5[g/L] para luego decrecer hasta 1,3[g/L] aproximadamente. Por otra parte, la concentración de ácido se mantiene nula hasta que aumenta hasta 20[g/L]. En la figura 37 se observa que la recuperación global de cobre alcanza un total de 51%.

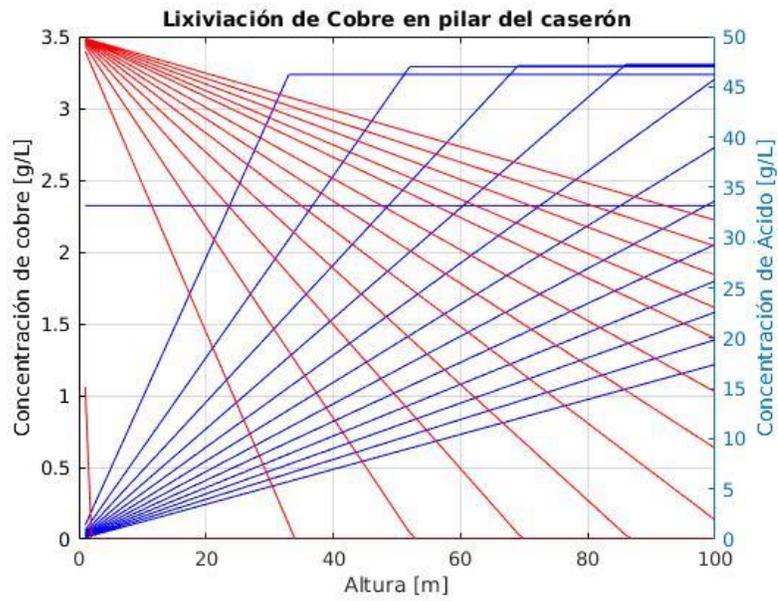


Figura 38: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 8 pulgadas.

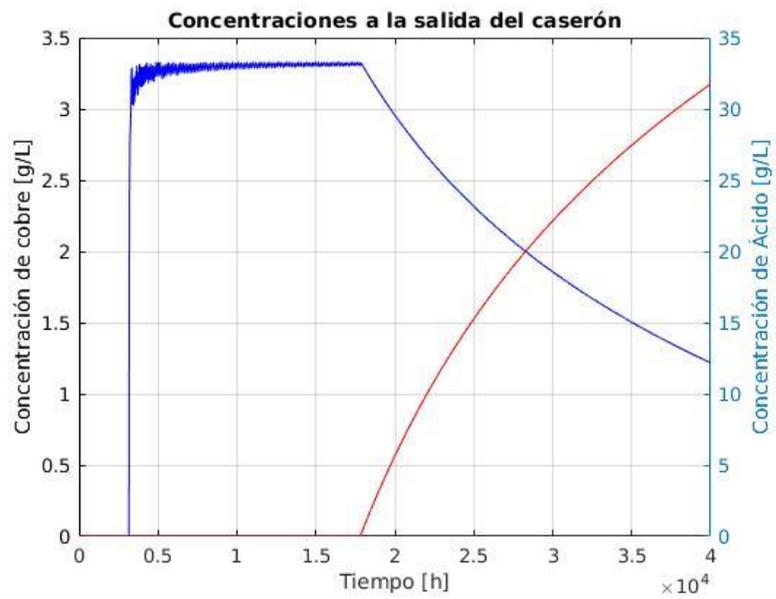


Figura 39: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 8 pulgadas.

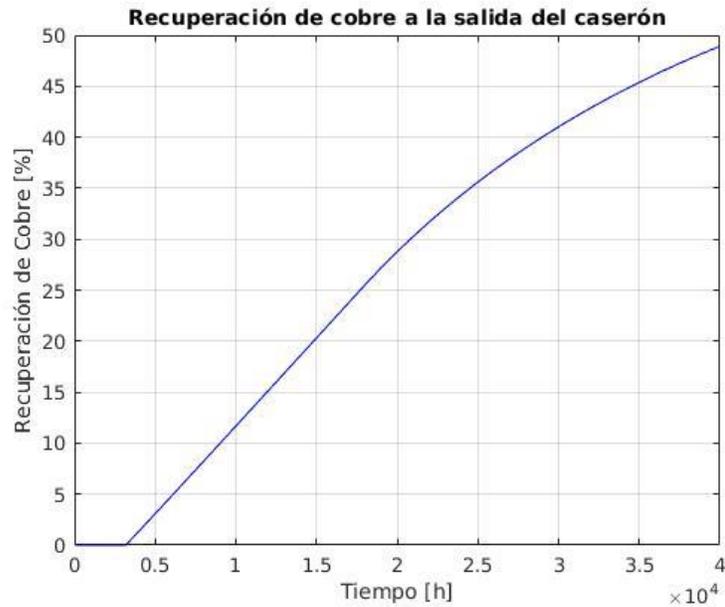


Figura 40: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 50[gpl] y partículas de 8 pulgadas.

Se observa en las figuras 38 y 39 que la concentración de cobre se establece en los 3,3[g/L], para luego decrecer hasta los 1,3[g/L] aproximadamente. En la figura 40 se puede observar que la recuperación global de cobre alcanza el 48%. Se observa que a medida que el aumento en la concentración de ácido disminuye la recuperación global de cobre, esto puede ser a causa del consumo de ácido del mineral, como se mencionaba anteriormente.

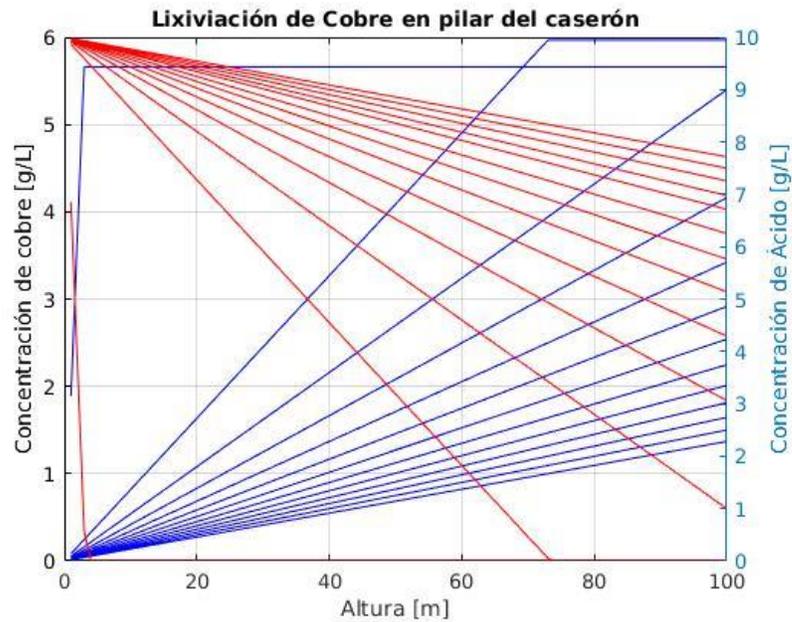


Figura 41: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 10 pulgadas.

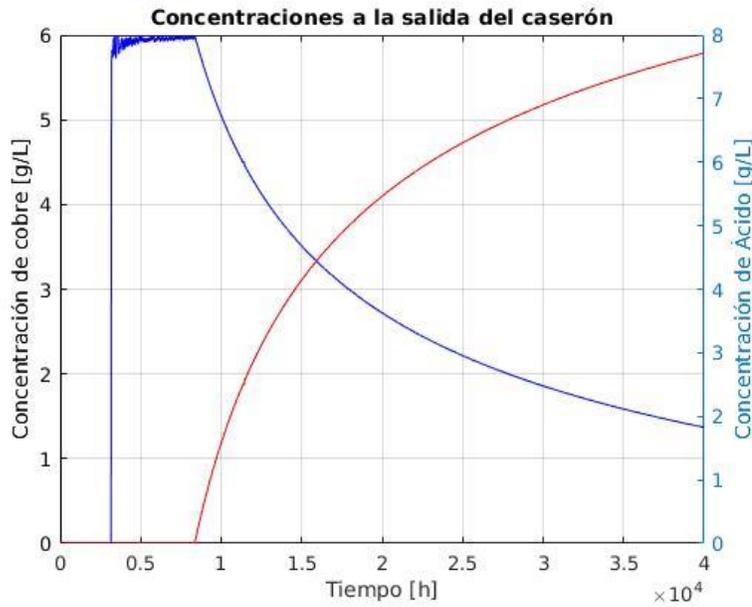


Figura 42: Concentraciones de cobre y ácido (10[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 10 pulgadas.



Figura 43: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 10[gpl] y partículas de 10 pulgadas.

Se observa en la figura 41 que el ácido percola más profundo que en comparación con los diámetros de partículas anteriores, esto se explica por la menor área de transferencia que se general al tener partículas de mayor tamaño. En la figura 42 se observa que la concentración de cobre alcanza una concentración de salida en torno a los 6[g/L] que decrecen paulatinamente una vez transcurrido un tiempo, situándose en torno a los 1,5[g/L]. Por otra parte, el ácido se mantiene nulo hasta que luego alcanza una concentración de 7,8[g/L]. Se observa en la figura 43 que la recuperación global de cobre alcanza un máximo de 60%.

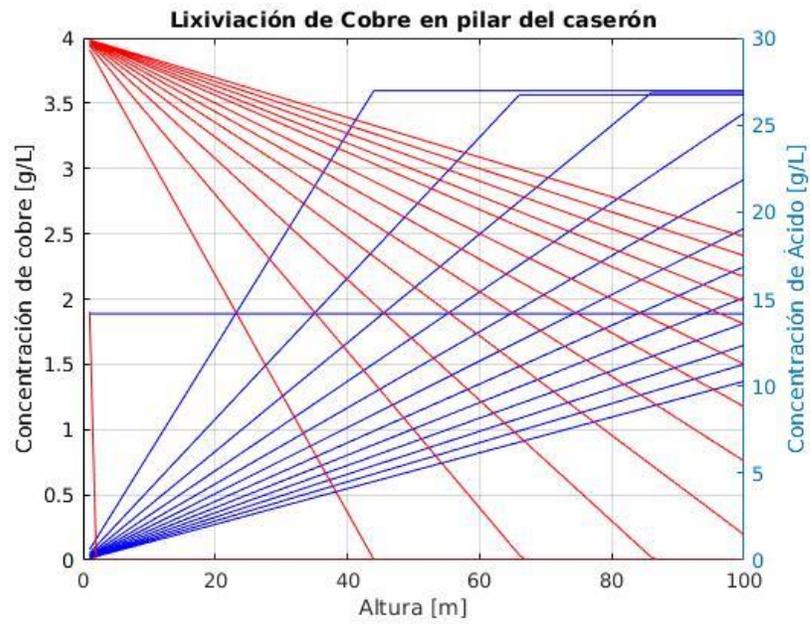


Figura 44: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 10 pulgadas.

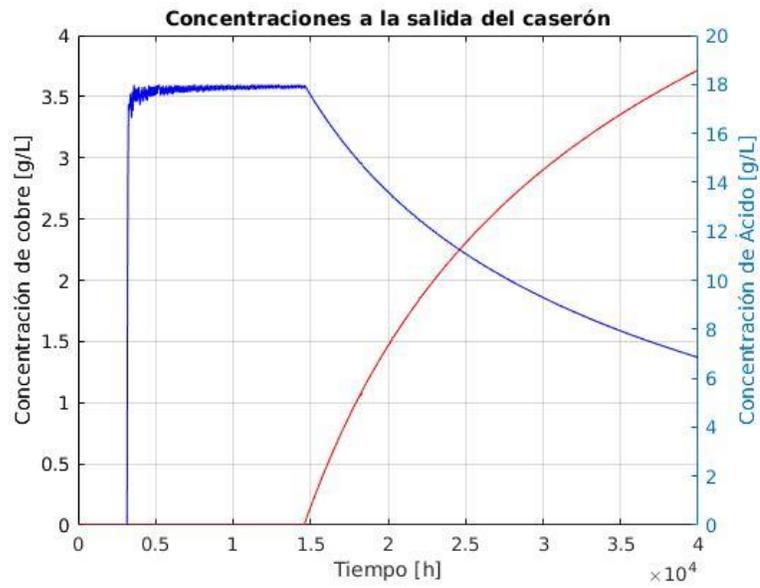


Figura 45: Concentraciones de cobre y ácido (30[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 10 pulgadas.

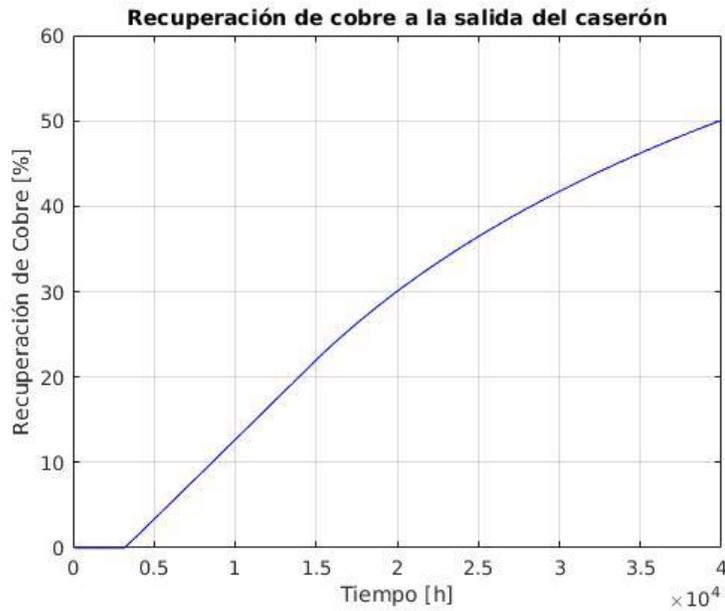


Figura 46: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 30[gpl] y partículas de 10 pulgadas.

Se observa en las figuras 44 y 45 que la concentración de cobre en la salida se establece en torno a los 3,5[g/L], que luego de un tiempo decrece paulatinamente hasta alcanzar un valor de 1,4[g/L]. Por otra parte, la concentración de ácido comienza nula y crece hasta alcanzar los 18,5[g/L]. En la figura 46 se observa un total de 50% de recuperación global de cobre.

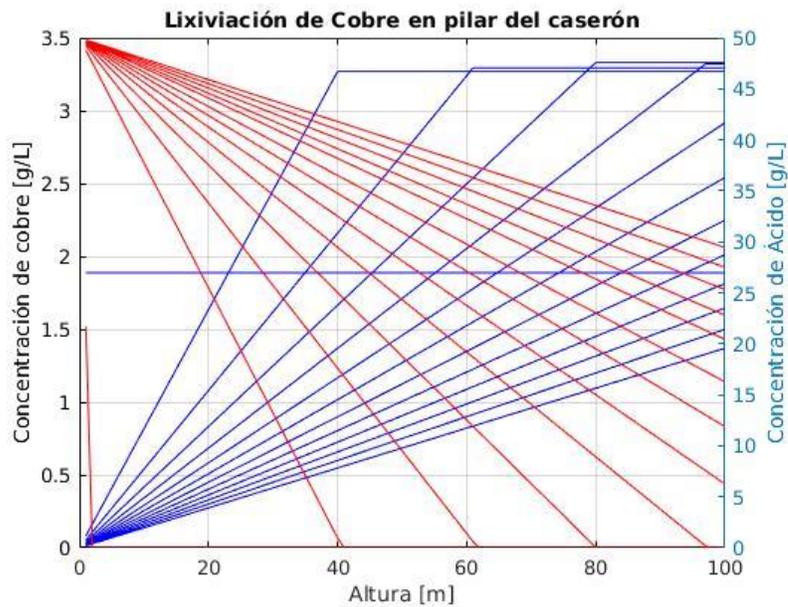


Figura 47: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a través de la altura a diferentes tiempos de lixiviación, para partículas de 10 pulgadas.

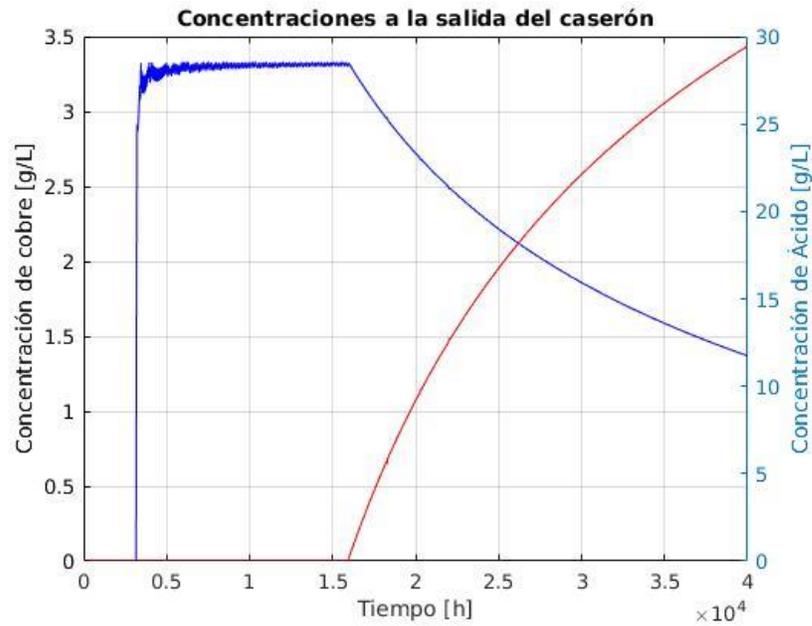


Figura 48: Concentraciones de cobre y ácido (50[gpl]) a la salida del caserón a través del tiempo, para partículas de 10 pulgadas.

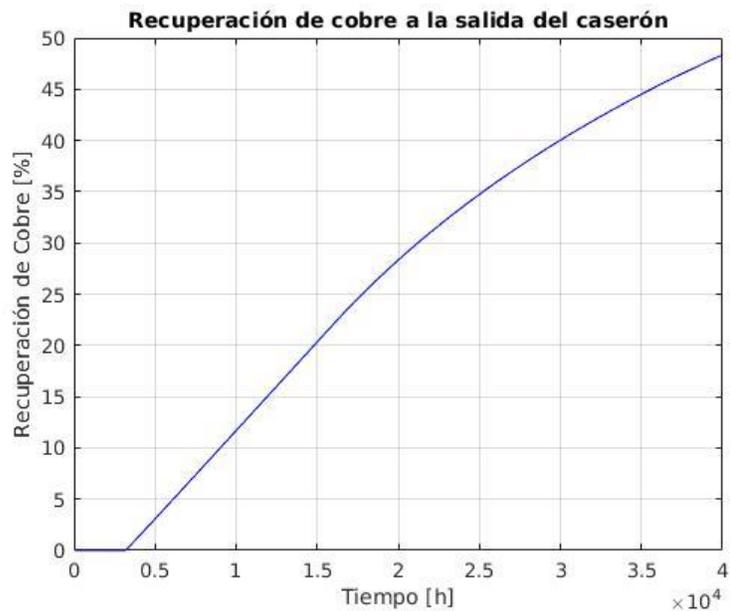


Figura 49: Recuperación global de cobre a través del tiempo para concentración de ácido de 50[gpl] y partículas de 10 pulgadas.

Se observa en las figuras 47 y 48 que la concentración de cobre recuperado se establece en torno a los 3,3[g/L] y luego decrece hasta alcanzar 1,4[g/L]. Por otra parte, la concentración de ácido comienza nula y luego de un tiempo comienza crecer hasta un valor de 29[g/L]. Como se puede apreciar en la figura 49, se obtiene una recuperación global de cobre correspondiente a 48% aproximadamente.

En las figuras 50, 51 y 52 se exponen los resultados de recuperación global de cobre para los diferentes diámetros de partícula con distintas concentraciones de ácido, al final se interpretan y discuten los resultados obtenidos.

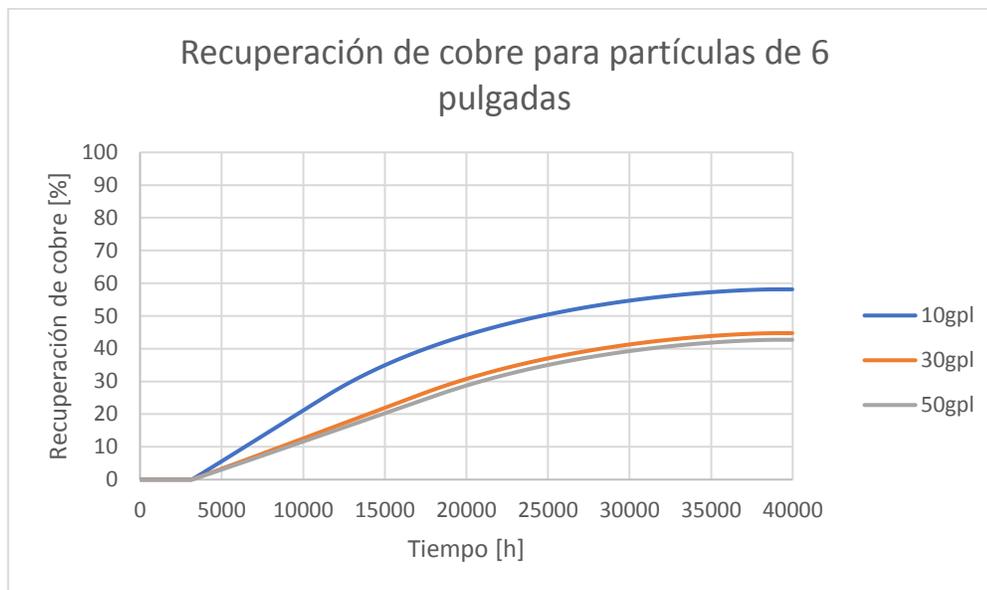


Figura 50: Recuperación global de cobre para partículas de 6 pulgadas con diferentes concentraciones de ácido.

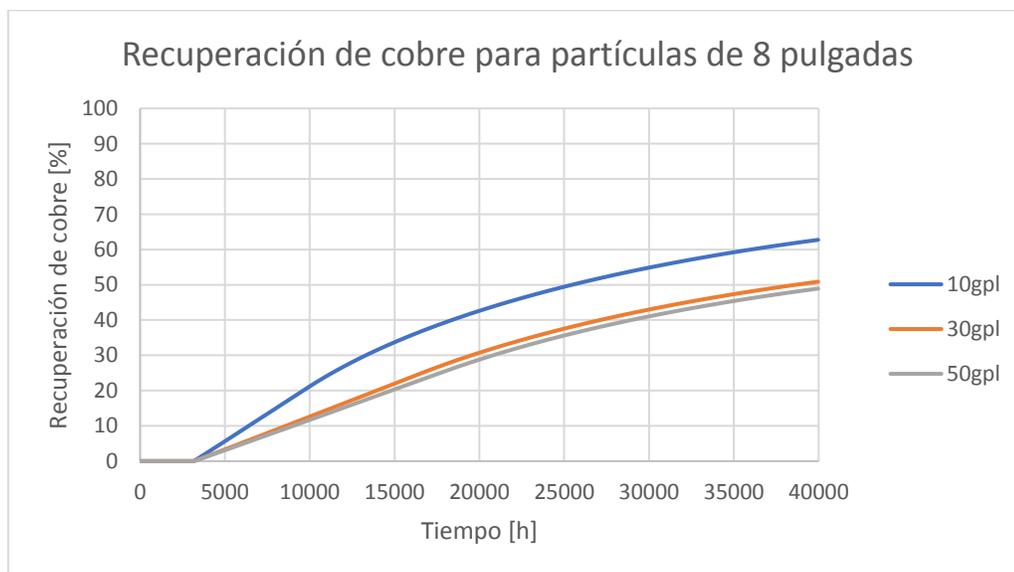


Figura 51: Recuperación global de cobre para partículas de 8 pulgadas con diferentes concentraciones de ácido.

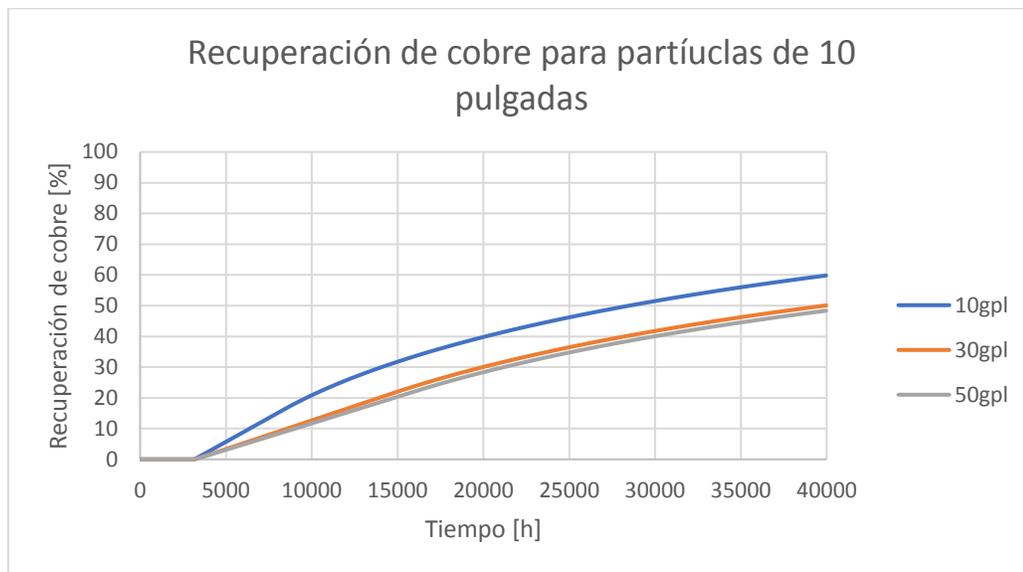


Figura 52: Recuperación global de cobre para partículas de 10 pulgadas con diferentes concentraciones de ácido.

Los resultados del modelo muestran que el efecto de un aumento en la concentración de ácido de la solución lixivante genera una reacción más efectiva para un mismo tamaño de partícula, esto se observa en que el ácido logra percolar una menor cantidad de metros, debido a una mayor reacción generada por un mayor consumo de ácido por parte del mineral. Con respecto a las concentraciones de salida de cobre, a medida que se aumenta la concentración de ácido se produce una concentración menor de cobre en la salida del caserón y esta se mantiene en torno a ese valor por una mayor cantidad de tiempo, lo que genera una menor recuperación global de cobre a través del tiempo de simulación. El efecto del consumo de ácido del mineral es el responsable de una menor recuperación total de cobre incluso utilizando mayores concentraciones de ácido, por lo tanto, se obtienen mejores resultados utilizando una menor concentración de ácido, correspondiente a 10 [g/L] en la simulación.

El efecto de la variación del diámetro de partícula del caserón tiene como consecuencia que, para una misma concentración de ácido, a medida se aumenta el tamaño del diámetro en el depósito el ácido percola a mayor profundidad, esto se debe a que al existir una menor área de contacto entre mineral y solución existe una menor lixiviación y, por lo tanto, una menor reacción de consumo de ácido por el mineral. Las soluciones con cobre a la salida del caserón alcanzan un peak de un valor similar para mismas concentraciones de ácido, pero a medida que se aumenta el diámetro de partícula decrece el tiempo en que estos valores se mantienen en el tiempo antes de comenzar a decrecer. Este efecto se debe a que al poseer partículas de mayor tamaño la solución demora más en penetrar el mineral para recuperar el cobre, ya que predomina el efecto de la difusión del cobre en la lixiviación por sobre la reacción. Finalmente, se observa que el aumento de diámetro de partícula en la recuperación global de cobre tiene un efecto positivo entre 6" y 8" (58% versus 62% de recuperación, respectivamente), pero un efecto negativo entre 8" y 10" (62% versus 60% de recuperación, respectivamente), ya que existe un aumento en la recuperación entre los primeros y una disminución entre los segundos, respectivamente. Si bien los valores totales de recuperación son similares entre los diámetros de partícula de mayor tamaño, la mayor recuperación total de cobre es para los diámetros de partícula de 8", con un 62% de recuperación total de cobre.

## 7. Planificación de la operación

Dentro de un proyecto de minería, la operación es un punto clave para poder estimar y coordinar la producción, costos y ganancias de un proyecto. Debido a esto es que se debe tener un buen balance entre la planificación minera y la planificación de producción, ya que el óptimo entre estas dos es lo que genera una maximización de la operación y, por lo tanto, los beneficios económicos asociados.

En este capítulo se busca proponer un ritmo de producción para un proyecto minero llamado Quetena [11], balanceando las operaciones mineras y químicas para la obtención de cobre con el fin de buscar un óptimo de producción. A continuación, se muestra una imagen correspondiente a la mina y la disposición de sus caserones.

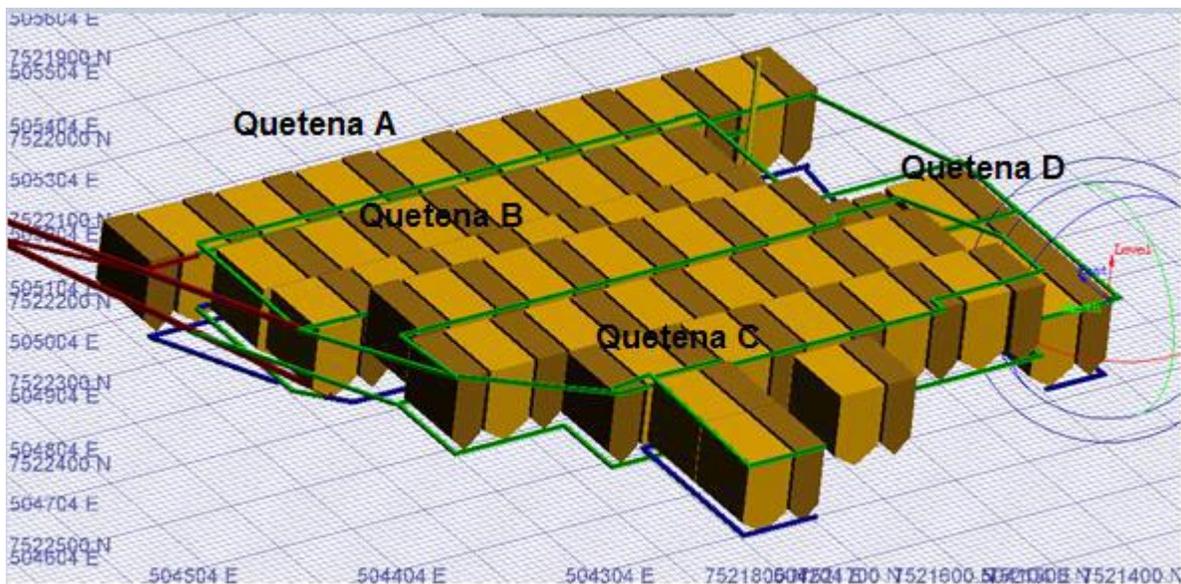


Figura 53: Configuración de caserones para la mina Quetena [11].

Como se puede observar en la figura 28, los caserones primarios (40 [m] ancho) corresponden a los caserones oscuros y los secundarios (60 [m] ancho) corresponden a los claros. Se destaca que se intercalan los caserones de 40 y 60 metros de ancho debido a que los segundos utilizan el método de recuperación de pilares para aprovechar todo el mineral a disposición.

### 7.1. Ritmo de producción de caserones

En la mina Quetena se planifica la construcción dos tipos de caserones, ambos poseen 100 metros de altura y 80 metros de profundidad, pero la diferencia está en su ancho. Los caserones primarios poseen 40 metros de ancho, mientras que los secundarios tienen 60 metros de ancho.

La cara libre tiene un ritmo de construcción de  $1 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right]$ , y a su vez, para caserones de 100 metros de altura el ritmo de construcción corresponde a  $1000 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{mes}} \right]$ . Gracias a esto se puede calcular el tiempo de construcción que demorarán los caserones primarios y secundarios del proyecto. Es importante nombrar el hecho de que la cara libre corresponde a remover el 30% del material total del caserón.

A continuación, se calculará el tiempo de construcción de un caserón primario (100x80x40), cabe destacar que el área transversal (caserón) corresponde a la profundidad por el ancho y, el área lateral (cara libre) corresponde a la altura por el ancho.

$$\text{Área transversal} = 3200 \text{ [m}^2\text{]} \quad (36)$$

$$\text{Área lateral} = 4000 \text{ [m}^2\text{]} \quad (37)$$

$$t_{\text{caserón}} = \frac{3200 \text{ [m}^2\text{]}}{1000 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{mes}} \right]} \quad (38)$$

$$t_{\text{caserón}} = 3,2 \text{ [mes]} \quad (39)$$

A este tiempo de construcción del caserón hay que sumarle el tiempo de preparación de la cara libre, que es necesario para poder elaborar el caserón mismo.

$$V_{\text{caserón}} = 100 \text{ [m]} \cdot 80 \text{ [m]} \cdot 40 \text{ [m]} = 320000 \text{ [m}^3\text{]} \quad (40)$$

$$\text{Cara libre} = 30\% \cdot V_{\text{caserón}} \quad (41)$$

$$\text{Cara libre} = \frac{3}{10} \cdot 320000 = 96000 \text{ [m}^3\text{]} \quad (42)$$

$$\text{Cara libre} = 96000 \text{ [m}^3\text{]} \cdot 1,7 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right] \quad (43)$$

$$\text{Cara libre} = 163200 \text{ [ton]} \quad (44)$$

$$\text{Ritmo cara libre} = 1 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right] \quad (45)$$

$$t_{\text{cara libre}} = \frac{163200 \text{ [ton]}}{4000 \text{ [m}^2\text{]} \cdot 1 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right]} \quad (46)$$

$$t_{\text{cara libre}} = 40,8 \text{ [días]} \cong 1,3 \text{ [mes]} \quad (47)$$

Por lo tanto, el tiempo total corresponde a:

$$t_{total\ caserón\ 1rio} = t_{cara\ libre} \cdot t_{caserón} \quad (48)$$

$$t_{total\ caserón\ 1rio} = 3,2[mes] + 1,3[mes] = 4,5[mes] \quad (49)$$

El cálculo para caserones secundarios es homólogo y se presenta el resultado a continuación.

$$t_{total\ caserón\ 2rio} = 6,1[mes] \quad (50)$$

Por lo tanto, el tiempo de preparación de caserones primarios y secundarios corresponde a 4,5 meses y 6,1 meses, respectivamente.

## 7.2. Ritmo de operación de caserones

La lixiviación de caserones debe ser planificada en conjunto con la producción de estos, para lograr una coordinación tal que permita una operación estable y en estado estacionario, lo que es el objetivo en todo proyecto minero de ISM. La configuración que se utiliza es la óptima según los resultados del modelo de simulación, que corresponde a una concentración de ácido de 10 [g/L] y partículas de 8 pulgadas de diámetro en el caserón.

Se plantea operar comenzando la lixiviación de los caserones con tiempos de inicio desfasados, con el fin de obtener un PLS con una concentración de ácido que no supere los 8 [g/L]. Se realiza el análisis de dos posibles ritmos de operación en función del tiempo de desfase de inicio entre 4 caserones. El primer caso, figura 54, corresponde a un desfase de tiempo correspondiente al 25% del tiempo total de simulación, lo que corresponde a 10.000 horas desde el inicio entre caserones. El segundo caso, figura 55, tiene un desfase del 7,97% (3.187,5 horas) del tiempo total de lixiviación, tiempo que demora el PLS en salir del caserón.

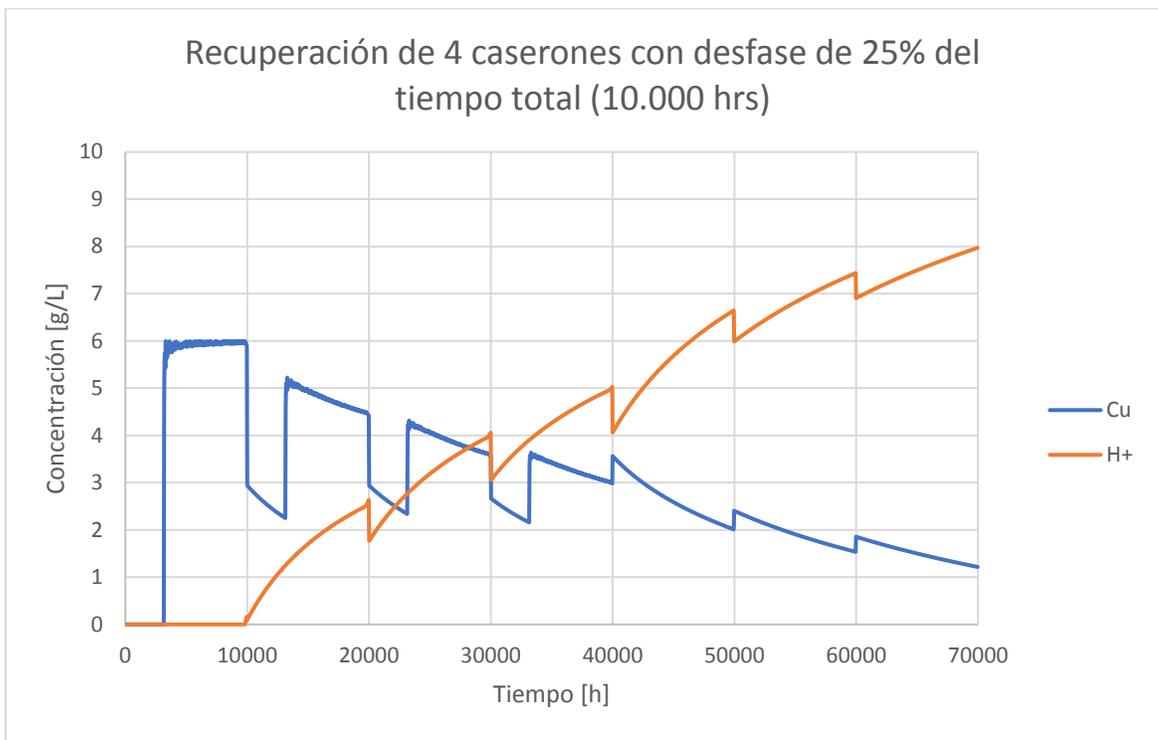


Figura 54: Operación de 4 caserones con desfase del 25% del tiempo total de simulación.

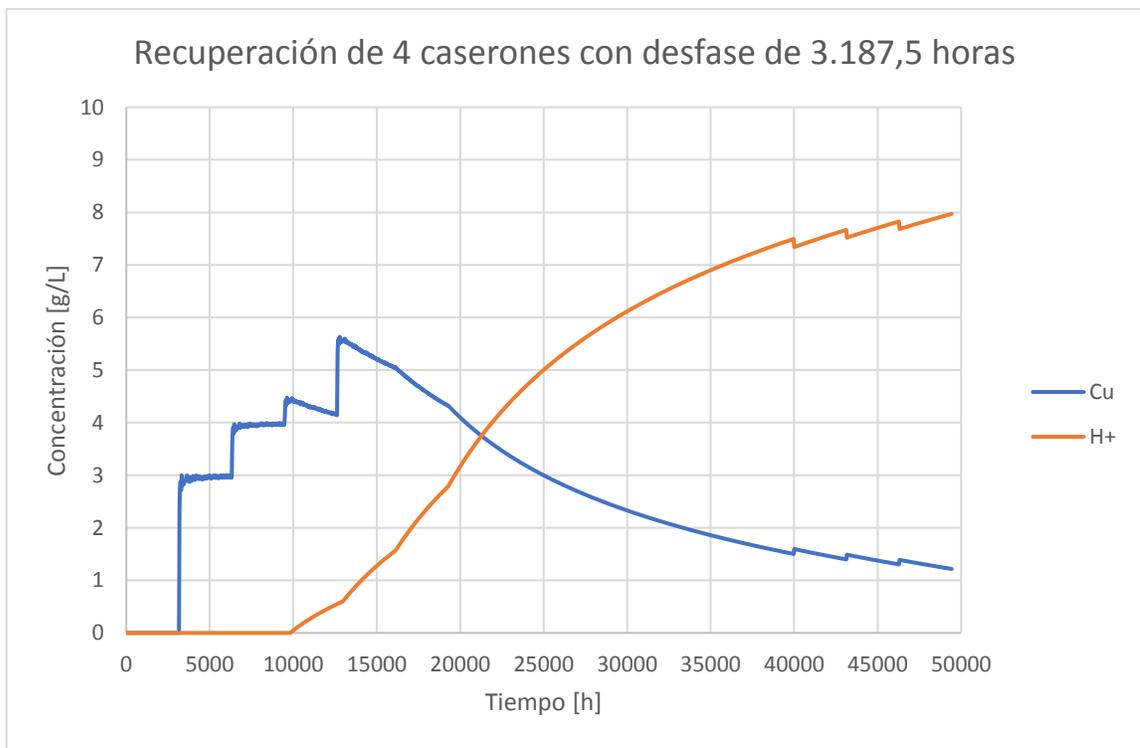


Figura 55: Operación de 4 caserones con desfase de 3.187,5 horas.

Como se puede observar en la figura 54, la concentración de cobre recuperado no supera los 6 [g/L] y decrece a través del tiempo hasta 1,3 [g/L] aproximadamente, al contrario de la concentración de ácido a la salida, que inicia con una concentración nula y aumenta paulatinamente hasta llegar a 8 [g/L]. Las concentraciones de cobre recuperado y de ácido a la salida poseen una fluctuación con forma de peaks separados por caídas a lo largo de la operación. Además, se observa un tiempo total de operación correspondiente a 70.000 horas.

En la figura 55 se observa que el cobre recuperado comienza con una concentración de 3 [g/L] y aumenta escalonadamente hasta aproximadamente 5,6 [g/L], antes de comenzar a decrecer a lo largo del tiempo hasta una concentración de 1,2 [g/L]. La concentración de ácido a la salida comienza con concentración nula y aumenta paulatinamente a lo largo de la operación hasta alcanzar los 8 [g/L]. Se destaca que en esta configuración de operación de caserones las concentraciones de salida son más estables que el primer caso, lo que favorece el proceso de SX-EW posterior a la lixiviación y, además, el tiempo total de operación es menor a 50.000 horas.

De las dos opciones de operación, se elige la segunda como óptima para operar debido a que las concentraciones de salida de cobre y de ácido son más estables a lo largo del tiempo, además posee un tiempo de operación total menor y, por último, su desfase de 3.187,5 horas corresponde a 4,4 meses lo que es similar al tiempo que demora un caserón primario en ser preparado como se vio en la sección 7.1. Por lo tanto, para la mina Quetena se plantea un ritmo de operación de lixiviación de caserones que comiencen con un desfase de tiempo correspondiente a 3187,5 horas, así mismo, se debe planificar la preparación de caserones en función de que su lixiviación no sea afectada y se cumplan los tiempos de operación planteados.

# Conclusiones

La lixiviación in situ mediante la explotación de caserones permite diseñar una alternativa de recuperación de yacimientos que no son explotables mediante proyectos de minería convencional, lo que se puede deber a su ubicación geográfica, baja ley de mineral y/o altos costos de implementación.

Se presenta la razón de lixiviación en conjunto con el modelo del núcleo sin reaccionar como una forma de obtener curvas de recuperación de cobre, se destaca que esta opción se utiliza para modelar pilas de lixiviación por lo que puede no ser exacta para la explotación mediante caserones, pero se considera una aproximación adecuada.

Se presenta una metodología para caracterizar las cinéticas de lixiviación de cobre y de consumo de ácido del mineral. La cinética de lixiviación de cobre caracterizada permite extrapolar los resultados de laboratorio a cualquier diámetro de partícula que se desee utilizar. La caracterización de la cinética de consumo de ácido del mineral permite extrapolar valores de consumo para cualquier concentración de ácido superior a los 5 [g/L].

Se desarrolla un modelo matemático que permite una simulación de la lixiviación de caserones en función de la velocidad de lixiviación de cobre y el consumo de ácido del mineral. Se simulan 3 diámetros de partícula con tres concentraciones de ácido diferentes para cada una. Los resultados con la mayor recuperación de cobre global (62%) corresponden a un diámetro de partícula de 8 pulgadas con una concentración de ácido de 10 [g/L].

Se plantea una planificación de operación para la mina Quetena, que corresponde a lixiviar caserones con un desfase de tiempo de 7,97% (3.187,5 horas) del tiempo total de lixiviación, lo que permite obtener concentraciones de salida más estables y minimizar el tiempo total de operación cumpliendo con que la concentración de ácido de salida no supera los 8 [g/L].

# Bibliografía

- [1] Ministerio de Minería, “Ley de mineral.” [Online]. Available: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-1/ley-de-mineral/>. [Accessed: 28-Nov-2017].
- [2] Ministerio de Minería, “Ley de cobre.” [Online]. Available: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-1/ley-de-cobre/>. [Accessed: 28-Nov-2017].
- [3] Consejo Minero, “Chile, país minero.” [Online]. Available: <http://dev.consejominero.cl/chile-pais-minero/>. [Accessed: 28-Nov-2017].
- [4] Consejo Minero, “Minería en Cifras,” 2017.
- [5] L. Sinclair and J. Thompson, “In situ leaching of copper: Challenges and future prospects,” *Hydrometallurgy*, vol. 157, pp. 306–324, 2015.
- [6] Codelco Educa, “Glosario L.” [Online]. Available: [https://www.codelcoeduca.cl/glosario/glosario\\_1.asp](https://www.codelcoeduca.cl/glosario/glosario_1.asp). [Accessed: 28-Nov-2017].
- [7] C. Bahamóndez, R. Castro, T. Vargas, and E. Arancibia, “In situ mining through leaching: Experimental methodology for evaluating its implementation and economic considerations,” *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 116, no. 7, pp. 689–698, 2016.
- [8] World Nuclear Association, “In situ leach mining of Uranium,” 2017. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/in-situ-leach-mining-of-uranium.aspx>. [Accessed: 28-Nov-2017].
- [9] B. of Mines, “Stope Leaching Reduces Surface Environmental Impacts From Underground Mining,” *Technol. News*, 1994.
- [10] T. Vargas, “Modelo cinético del núcleo sin reaccionar,” *Procesos hidro-eléctro Met.*, 2010.
- [11] J. Iriarte, “Evaluación de explotación en yacimientos Toki y Quetena mediante lixiviación de caserones,” Universidad de Chile, 2015.
- [12] J. Vallejos, “Diseño empirico de caserones,” *Mecánica de rocas MI4060*, p. 48, 2013.
- [13] M. P. T., “Métodos de explotación - Sublevel Stopping,” *MI4060-1 Mecánica de Rocas*, pp. 1–8, 2010.
- [14] B. C. Anyosa, “Método de explotación Subterránea: Sublevel stopping,” 2015. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/BraulioCastilloAnyos/sublevel-stopping-48585372>.
- [15] J. Urrutia Herrera, “Influencia de la concentración de ácido sobre la cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre,” p. 85, 2001.

# Anexo A

A continuación, se presenta el cálculo del tiempo total de lixiviación y la conversión alcanzada para  $t = 2200$  días.

Se utiliza la fórmula expuesta en el trabajo de laboratorio que expresa la recuperación para partículas de tamaño de  $6''$  o menos [11], la cual es la siguiente:

$$Rec_{Cu} = 11,925 \cdot \ln(t) - 25,5 \text{ [%]}$$

Con lo que se calcula que para un tiempo de 2200 días se obtiene una recuperación de 66,27%, es decir,  $x=0,66$ . Luego calculamos el tiempo total de lixiviación para este caso:

$$\tau_1 = \frac{2200 \text{ [días]}}{\left[1 - 3(1 - 0,66)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - 0,66)\right]} = \frac{2200 \text{ [días]}}{[1 - 1,453 + 0,675]} \quad (51)$$

$$\frac{2.200 \text{ [días]}}{[1 - 1,453 + 0,675]} = \frac{2200 \text{ [días]}}{0,2216} \quad (52)$$

$$\frac{2200 \text{ [días]}}{0,2216} = 9.927 \text{ [días]} \quad (53)$$

Una vez obtenido el tiempo total de lixiviación, se utiliza la relación lineal entre  $\tau$  y el cuadrado del diámetro de partícula:

$$\tau_1 = kD_1^2 \quad (54)$$

$$\frac{\tau_1 = kD_1^2}{\tau_2 = kD_2^2} \quad (55)$$

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (56)$$

$$\tau_2 = \frac{\tau_1 D_2^2}{D_1^2} \quad (57)$$

Luego reemplazamos  $D_1^2 = 6''$ ,  $\tau_1 = 9927$  [días] y, finalmente,  $D_2^2 = 10''$  (15'', 18'') para obtener el tiempo total de lixiviación para el tamaño de partícula deseado, y posteriormente, la recuperación que alcanza a los 2200 días:

$$\tau_2(10'') = \frac{9927 \text{ [días]} 100 \text{ ["}^2]}{36 \text{ ["}^2]} = 27575 \text{ [días]} \quad (58)$$

$$\frac{t_2}{\tau_2} = 0,0798 = \left[1 - 3(1 - x_2)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - x_2)\right] \quad (59)$$

Esto se resuelve utilizando un solver y se obtiene la siguiente recuperación para  $t = 2200$  [días]:

$$x_2 = 0,435 = 43,5 \text{ [\%]} \quad (60)$$

Así mismo, se repite el cálculo para  $D_3^2 = 15''$  y  $D_4^2 = 18''$  análogamente y se obtienen los siguientes resultados:

$$\tau_3(15'') = 62.043,75 \text{ [días]} \quad (61)$$

$$x_3 = 0,302 = 30,2 \text{ [\%]} \quad (62)$$

$$\tau_4(18'') = 89.343 \text{ [días]} \quad (63)$$

$$x_4 = 0,255 = 25,5 \text{ [\%]} \quad (64)$$

Con estos resultados y considerando la misma forma de las curvas se pueden proyectar las curvas de recuperación vs ciclo para un tiempo de 2200 días presentada en el cuerpo del informe.

# Anexo B

## B.1. Ejemplo de cálculo de la razón de lixiviación

La ecuación de razón de lixiviación es la que se presenta a continuación:

$$RL \left[ \frac{m^3}{ton} \right] = \frac{TR \left[ \frac{L}{h \cdot m^2} \right] \cdot Ciclo [días] \cdot FR \left[ \frac{h}{días} \right]}{\rho_{ap} \left[ \frac{ton}{m^3} \right] \cdot H[m] \cdot 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right]} \quad (65)$$

Donde TR es la tasa de riego (flujo ingresado a cada módulo por metro cuadrado en riego), FR es la frecuencia de riego (tiempo diario de cada módulo expuesto a riego),  $\rho_{ap}$  es la densidad aparente del mineral y H es la altura de la pila.

Como se menciona en el cuerpo de este trabajo, se requiere de la densidad aparente del mineral, el cual se supone  $2,5 \left[ \frac{ton}{m^3} \right]$  y una frecuencia de riego de  $24 \left[ \frac{h}{día} \right]$ . Además, se requiere del ciclo y la tasa de riego, que en este caso se considerarán  $646 [días]$  y un rango entre  $2$  y  $8 \left[ \frac{L}{h \cdot m^2} \right]$ , respectivamente.

Así, es posible calcular la razón de lixiviación de la siguiente forma:

$$RL \left[ \frac{m^3}{ton} \right] = \frac{2 \left[ \frac{L}{h \cdot m^2} \right] \cdot 646 [días] \cdot 24 \left[ \frac{h}{días} \right]}{2,5 \left[ \frac{ton}{m^3} \right] \cdot 100[m] \cdot 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right]} \quad (66)$$

$$RL \left[ \frac{m^3}{ton} \right] = \frac{31008}{250000} \quad (67)$$

$$RL \left[ \frac{m^3}{ton} \right] = 0,124 \quad (68)$$

De este modo, se realiza el cálculo homólogo para las diferentes tasas de riego y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 1: Resultados calculados de la razón de lixiviación.

Tasa de riego $\left[\frac{L}{h \cdot m^2}\right]$	Razón de lixiviación $\left[\frac{m^3}{ton\ mineral}\right]$
2	0,124
3	0,186
4	0,248
5	0,310
6	0,372
7	0,434
8	0,496

# Anexo C

## C.1. Función de recuperación de cobre

```
function f = recuperacion(x,a)
    f = (1-3*((1-x)^(2/3))+2*(1-x)-a);
end
```

## C.2. Función de consumo de ácido

```
function f = consumo(Ac)
    f = ((0.3334*Ac)-1.6667);
end
```

## C.3. Programa de modelo de lixiviación

```
clc
%inputs
TR=8;           %Tasa de riego [L/h*m2]
Ac=50;          %Concentracion acido [g/L]
d=1.7;          %Densidad aparente del mineral [ton/m3]
D=15.24;        %Diametro de partícula [cm]
Hm=15;          %Humedad del lecho [%]
A=1;            %Area [m2]
LCu=0.9;        %Ley de cobre [%]
tmax=40000;     %Tiempo maximo en que el programa calcula [h]
%programa
K=153.9;        %Contante para calcular Tau para otros diametros de partícula [h/cm2]
Tau=(K*(D^2)); %Tiempo total de lixiviacion para un diametro D [h]
Q=(TR*A);       %Flujo de solución lixivante [L/h]
Vsln=(d*(Hm/100)*1000); %Volumen que ocupa la solución inyectada dentro del delta de volumen [L]
dt=Vsln/Q;      %Delta de tiempo en que se realizan los calculos del programa [h]
t=dt;           %Tiempo inicial [h]
PP=tmax/dt;     %Espaciamiento entre t=dt y t=tmax
PPP=floor(PP);  %Eliminar decimales al valor de espaciado
s=linspace(t,tmax,PPP); %Vector de tiempo para graficar
X=zeros(1,PPP); %Matriz vacia para rellenar con las recuperaciones de cobre en el tiempo [kg]
L=zeros(100,PPP); %Matriz vacia para rellenar con las recuperaciones de los delta de volumen (filas)
para cada tiempo (columnas)
i=1;            %Valor inicial del contador i
M=zeros(1,PPP); %Vector que guarda la diferencia de concentración de cobre recuperado por delta de tiempo/delta de volumen
conv=zeros(1,PPP);
CONV=zeros(100,PPP);
v=0;
c=0;
```

```

while t<=tmax
    a=(t/Tau);
    if a>=1
        %No puede existir mas de un 100% de recuperacion en la lixiviacion
        a=1;
    end
    DeltaVolumen=1000;
    %Delta de volumen fijo en el que subdivide el pilar, corresponden a 100
    volúmenes en serie [L]
    CobreTot=d*DeltaVolumen*LCu/100;
    %Cobre existente en cada DeltaVolumen [kg]
    x=fsolve(@(x)recuperacion(x,a),0.6);
    %Ecuacion del modelo del N.S.R. que entrega la recuperacion de
    cobre [%]
    CobreRec=(CobreTot*x);
    %Cobre recuperado en el DeltaVolumen [kg]
    X(i)=CobreRec;
    %Se guarda en la matriz de una fila la recuperacion de cobre [kg]
    conv(i)=x;
    if i==1
        M(i)=[(X(i))*1000/Vsln];
        %Vector que guarda la primera concentracion de cobre [g/L]
        i=i+1;
        %Contador para i
        t=t+dt;
        %Paso de tiempo
    else
        M(i)=[((X(i)-X(i-1))*1000)/Vsln];
        %Vector que guarda los delta de cobre
        [g/L]
        %Se guarda la altura en un vector
        i=i+1;
        %Contador para i
        t=t+dt;
        %Paso de tiempo
    end
end

%Operacion que genera una matriz de 100 filas iguales, con el vector M.
G= repmat(M,100,1);

%Iteracion para rellenar la matriz con los datos obtenidos en la matriz G, en base al vector X.
for i=1:100
    %Hay un total de 100 DeltaV a lo largo de los 100 metros del pilar
    for j=1:PPP
        %El tiempo va desde 1 hasta PPP horas, se calcula cada dt horas
        if i==1
            %Condicion inicial
            L(i,j)= G(i,j);
        elseif j<i
            %No hay recuperacion para volúmenes que aun no han tenido paso de solucion
            lixivante
            L(i,j)= 0;
        else
            %Llenado de la matriz con el delta de recuperacion de cobre en g/L de cada
            DeltaVolumen para cada dt
            L(i,j)=L(i-1,j-1);
        end
    end
end

%Iteracion para crear la matriz con los elementos diagonales acumulados
B=zeros(100,PPP);

for i=1:100
    for j=1:PPP
        if i==1
            B(i,j)= L(i,j);
        elseif j<i
            B(i,j)= 0;
        else
            B(i,j)=[(B(i-1,j-1))/(i-1)]*i;
        end
    end
end

```

```

end
end

%Consumo de H+
T=zeros(100,PPP); %Matriz de consumo de H+
for i=1:100 %Llenado de las concentraciones iniciales de H+
    for j=1:PPP
        if j>=i
            T(i,j)=Ac;
        end
    end
end
end
BB=(consumo(Ac)*B); %Consumo de H+ para cada delta de volumen en el tiempo
BT=(T-BB); %Resta de concentracion de H+ en base a la recuperacion de Cu

for i=1:100 %Si la concentracion de H+ es negativa, se mantiene la concentracion de cobre (ya que no se
sigue lixiviando)
    for j=1:PPP
        if BT(i,j)<0 %asi ocurre para todos los BT<0, hay que lograr que sea solo para el primero
            B(i,j)=B(i-1,j-1); %((BT(i,j)+50)/b);
            %BT(i+1,j+1)=0;
            %if B(i-1,j-1)~= B(i-2,j-2)
            % c=c+1;
            % v=v+BT(i,j)+50;
            %end
        end
    end
end
end

for i=1:100 %Si la concentracion de H+ es negativa, significa que es igual a 0, ya que se acabo el acido
    for j=1:PPP
        if BT(i,j)<0
            BT(i,j)=0;
        end
    end
end
end

%Matriz de conversiones en el tiempo para cada delta de volumen
g= repmat(conv,100,1);
for i=1:100 %Llenado de la matriz de conversiones para los volumenes en el tiempo
    for j=1:PPP
        if i==1
            CONV(i,j)=g(i,j);
        elseif j<i
            CONV(i,j)= 0;
        else
            CONV(i,j)=CONV(i-1,j-1);
        end
    end
end
end

for i=1:100 %Si se acaba el H+, no se sigue lixiviando, por lo tanto la conversion es 0 en los bloques
siguientes
    for j=1:PPP
        if BT(i,j)==0
            CONV(i,j)=0;
        end
    end
end

```

```

    end
end
end

%Vector de concentracion de cobre para la salida del caserÃ³n en el tiempo
SCu=B(100,:);
SH=BT(100,:);

%Vector de salida con las recuperaciones acumuladas
AA=B*(Vsln/1000); %Conversion de la matriz de recuperaciones de [g/L] a [kg]
ZZ=AA(100,:); %Vector con recuperaciones a la salida del pilar (DeltaVolumen 100) en [kg]
for i=1:PPP %Generacion del vector
    if i==1
        ZZ(i)= ZZ(i);
    else
        ZZ(i)= ZZ(i)+ZZ(i-1);
    end
end
end
TotalCu=(CobreTot*100); %Cobre total en el pilar del caseron [kg]

%Vector con recuperaciones de cobre a la salida del pilar en porcentaje del total existente del pilar
for i=1:PPP
    ZZ(i)= ((ZZ(i)*100)/TotalCu);
end

%Grafico
z=[1:1:100]; %Vector de altura para utilizar en graficos
yl1=diag(B);
yl2=diag(B,96);
yl3=diag(B,192);
yl4=diag(B,288);
yl5=diag(B,384);
yl6=diag(B,480);
yl7=diag(B,576);
yl8=diag(B,672);
yl9=diag(B,768);
yl10=diag(B,864);
yl11=diag(B,960);
yl12=diag(B,1056);
yl13=diag(B,1154);
f1=figure;
figure(f1);
plot(z,yl1,'b',z,yl2,'b',z,yl3,'b',z,yl4,'b',z,yl5,'b',z,yl6,'b',z,yl7,'b',z,yl8,'b',z,yl9,'b',z,yl10,'b',z,yl11,'b',z,yl12,'b',z,yl13,'b')
title('LixiviaciÃ³n de Cobre en pilar del caserÃ³n')
xlabel('Altura [m]')
ylabel('ConcentraciÃ³n de cobre [g/L]')
hold on
yyaxis right
yr1=diag(BT);
yr2=diag(BT,96);
yr3=diag(BT,192);
yr4=diag(BT,288);
yr5=diag(BT,384);
yr6=diag(BT,480);
yr7=diag(BT,576);

```

```

yr8=diag(BT,672);
yr9=diag(BT,786);
yr10=diag(BT,864);
yr11=diag(BT,960);
yr12=diag(BT,1056);
yr13=diag(BT,1154);
plot(z,yr1,'r',z,yr2,'r',z,yr3,'r',z,yr4,'r',z,yr5,'r',z,yr6,'r',z,yr7,'r',z,yr8,'r',z,yr9,'r',z,yr10,'r',z,yr11,'r',z,yr12,'r',z,yr13,
'r')
ylabel('Concentraci3n de cido [g/L]')
grid on
hold off

```

```

f2=figure;
figure(f2);
z1=diag(CONV);
z2=diag(CONV,96);
z3=diag(CONV,192);
z4=diag(CONV,288);
z5=diag(CONV,384);
z6=diag(CONV,480);
z7=diag(CONV,576);
z8=diag(CONV,672);
z9=diag(CONV,786);
z10=diag(CONV,864);
z11=diag(CONV,960);
z12=diag(CONV,1056);
z13=diag(CONV,1154);
plot(z,z1,'g',z,z2,'g',z,z3,'g',z,z4,'g',z,z5,'g',z,z6,'g',z,z7,'g',z,z8,'g',z,z9,'g',z,z10,'g',z,z11,'g',z,z12,'g',z,z13,'g')
title('Conversi3n del pilar en la lixiviaci3n del caser3n')
ylabel('Conversi3n')
xlabel('Altura [m]')
grid on

```

```

f3=figure;
figure(f3);
plot(s,SCu,'b')
title('Concentraciones a la salida del caser3n')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Concentraci3n de cobre [g/L]')
hold on
yyaxis right
plot(s,SH,'r')
ylabel('Concentraci3n de ácido [g/L]')
grid on

```

```

f4=figure;
figure(f4)
plot(s,ZZ,'b')
title('Recuperaci3n de cobre a la salida del caser3n')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Recuperaci3n de Cobre [%]')
grid on
hold off

```