

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| 1.1. Antecedentes | 10 |
| 1.2. Definición del problema y propuesta | 11 |
| 1.3. Hipótesis..... | 12 |
| 1.4. Objetivos | 12 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 12 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 12 |
| 1.5. Alcances | 13 |
| CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.1. Agua en la minería del cobre en Chile | 14 |
| 2.2. Geología de los yacimientos de cobre..... | 16 |
| 2.3. Hidrometalurgia | 19 |
| 2.4. Lixiviación de minerales sulfurados de cobre..... | 25 |
| 2.4.1. Medios de lixiviación para minerales sulfurados | 28 |
| 2.4.1.1. Medio Sulfato | 29 |
| 2.4.1.2. Medio Amoniacal | 29 |
| 2.4.1.3. Nitrato..... | 30 |
| 2.4.1.4. Biolixiviación | 30 |
| 2.4.1.5. Medio Clorurado | 31 |
| 2.4.2. Lixiviación en medios clorurados..... | 31 |
| 2.4.3. Complejos de cloro | 33 |
| 2.4.4. Capa pasivante | 34 |
| 2.5. Mecanismos de disolución de la calcopirita en medios clorurados | 35 |
| 2.5.1. Disolución oxidante | 35 |
| 2.5.2. Disolución reductora/oxidante..... | 36 |
| 2.5.3. Disolución no oxidativa..... | 37 |
| 2.5.4. Disolución no oxidante/oxidante | 38 |
| 2.6. Cinética de disolución de sulfuros de cobre..... | 40 |
| 2.6.1. Arrhenius y el cálculo de la energía de activación (Ea)..... | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7. Agua de mar | 43 |
| 2.8. Características del agua de mar | 45 |
| CAPÍTULO III: METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 48 |
| 3.1. Reactivos químicos y equipos | 48 |
| 3.1.1. Reactivos..... | 48 |
| 3.1.2. Equipos | 49 |
| 3.1.3. Muestra de mineral | 52 |
| 3.2. Procedimiento experimental..... | 55 |
| 3.2.1. Disminución de tamaño del mineral | 55 |
| 3.2.2. Pruebas de lixiviación agitada | 58 |
| 3.2.2.1 Preparación de solución lixivante..... | 58 |
| 3.2.2.2. Lixiviación en agitador termo calefaccionado..... | 59 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS | 62 |
| 4.1. Agua de Mar v/s Agua potable con una variación de concentración de cloruro, con tres semanas de lixiviación a 35 °C..... | 62 |
| 4.2. Variación de concentración de Cloruro a 0,2 de H_2SO_4 , con tres semanas de lixiviación a 35 °C..... | 64 |
| 4.3. Variación de concentración de Cloruro a 0,5 de H_2SO_4 , con tres semanas de lixiviación a 35 °C..... | 66 |
| 4.4. Variación de concentración de Cloruro a 1,0 de H_2SO_4 , con tres semanas de lixiviación a 35 °C..... | 67 |
| 4.5. Efecto del potencial de la solución en la extracción de cobre en pruebas a diferentes concentraciones de H_2SO_4 y $NaCl$ | 69 |
| 4.6. Efecto del pH en la extracción de cobre..... | 72 |
| 4.7. Efecto de la temperatura en la extracción de cobre en pruebas a 35, 50 y 70 °C | 75 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES | 79 |
| CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES | 81 |
| BIBLIOGRAFÍA | 82 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1. Reacciones esperadas durante la lixiviación de los principales sulfuros de cobre en medio cloruro – ácido sulfúrico (Valore calculaos por HSC) | 34 |
| Tabla 2.2. Componentes principales del agua de mar en mol/kg de solución (Millro et al, 2016)..... | 44 |
| Tabla 2.3. Composición del agua de mar, asumiendo total ionización (Singh et al., 1973).44 | |
| Tabla 3.1. Principales iones presentes en el agua de mar..... | 48 |
| Tabla 3.2 Composición del material sulfurado de cobre, resultados FRX..... | 53 |
| Tabla 3.3. Composición mineralógica de la muestra estudiada | 54 |
| Tabla 3.4. Minerales de Cobre presentes en la muestra de estudio | 54 |
| Tabla 3.5. Matriz Experimental de pruebas de lixiviación a 35 °C..... | 61 |
| Tabla 4.1. Constantes cinéticas en función de la temperatura para el mineral de calcopirita | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Proceso de flotación para la producción de concentrados de cobre (modificado Dirección de estudio y políticas públicas, 2018)..... | 15 |
| Figura 2.2 Proceso hidrometalúrgico para la producción de cobre (modificado Dirección de estudio y políticas públicas, 2018). | 16 |
| Figura 2.3 Esquema de un yacimiento porfídico de cobre, modificado por Bartlett (1998) 18 | |
| Figura 2.4. Tratamiento de lixiviación de sulfuros y tipo de producción final para el azufre contenido (Domic, 2001)..... | 25 |
| Figura 2.5. Diagrama de estabilidad del sistema Cu-H ₂ O, a 80 °C (HSC Chemistry) | 27 |
| Figura 2.6. Mecanismo de disolución oxidante de la calcopirita en medios de ácido férrico y cloruro cúprico (Velásquez, 2008) | 36 |
| Figura 2.7. Esquema del Mecanismo alternativo de disolución de la calcopirita no oxidante/oxidante (Velásquez, 2008) | 39 |
| Figura 3.1. Balanza Analítica | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.2. Balanza Electrónica..... | 50 |
| Figura 3.3. Bascula Electrónica..... | 50 |
| Figura 3.4. Equipo para medir pH | 51 |
| Figura 3.5. Equipo para medir potencial. | 51 |
| Figura 3.6. Agitador termo calefaccionado | 52 |
| Figura 3.7. Distribución de minerales de acuerdo a análisis mineralógico | 55 |
| Figura 3.8. Mineral de Cabeza | 56 |
| Figura 3.9. Circuito de equipos de reducción de tamaño para el mineral de estudio | 57 |
| Figura 3.10. Diferencia de tamaño del mineral después de los procesos de chancado y molienda | 57 |
| Figura 3.11. Toma de muestra mediante la técnica de roleo y cuarteo | 57 |
| Figura 3.12. Análisis granulométrico en ro-tap..... | 57 |
| Figura 3.13. Curva de distribución granulométrica del mineral sulfurado de cobre | 58 |
| Figura 3.14. Botellas para pruebas de lixiviación | 60 |
| Figura 3.15. Tapa de botella con perforaciones para el ingreso de oxígeno | 60 |
| Figura 3.16. Montaje de botellas en agitador termo calefaccionado | 60 |
| Figura 3.17. Muestras filtradas para análisis químicos | 60 |
| Figura 4.1. Recuperación de Cu a 35 °C, usando 20 g/L de NaCl, 0,2 de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L Cu ₂ + en botellas agitadas por 504 horas. | 62 |
| Figura 4.2. Recuperación de Cu a 35 °C, usando 50 g/L de NaCl, 0,2 de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L Cu ₂ + en botellas agitadas por 504 horas. | 63 |
| Figura 4.3. Recuperación de Cu a 35 °C, usando 100 g/L de NaCl, 0,2 de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L Cu ₂ + en botellas agitadas por 504 horas. | 64 |
| Figura 4.4 Recuperación de Cu a 35 °C, usando 0 g/L, 20 g/L y 50 g/L de NaCl, 0,2 de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L Cu ₂ + en botellas agitadas por 504 horas..... | 65 |
| Figura 4.5. Recuperación de Cu a 35 °C, usando 0 g/L, 100 g/L y 160 g/L de NaCl, 0,2 de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L Cu ₂ + en botellas agitadas por 504 horas..... | 66 |
| Figura 4.6. Recuperación de Cu a 35 °C, usando 0 g/L, 20 g/L 50 g/L y 100 g/L de NaCl, 0,5 de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L Cu ₂ + en botellas agitadas por 504 horas. | 67 |
| Figura 4.7. Recuperación de Cu a 35 °C, usando 0 g/L, 20 g/L 50 g/L y 100 g/L de NaCl, 1,0 de H ₂ SO ₄ y 0,5 g/L Cu ₂ + en botellas agitadas por 504 horas | 68 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.8. Efecto del potencial sobre la disolución de Cu a 7 días. Dosificación 0,5 g/L Cu ²⁺ , 0,2-0,5-1,0 M H ₂ SO ₄ y diferentes concentraciones de NaCl..... | 71 |
| Figura 4.9. Efecto del potencial sobre la disolución de Cu a 14 días. Dosificación 0,5 g/L Cu ²⁺ , 0,2-0,5-1,0 M H ₂ SO ₄ y diferentes concentraciones de NaCl. | 71 |
| Figura 4.10. Efecto del potencial sobre la disolución de Cu a 21 días. Dosificación 0,5 g/L Cu ²⁺ , 0,2 M H ₂ SO ₄ y diferentes concentraciones de NaCl. | 72 |
| Figura 4.11. Efecto del pH sobre la disolución de Cu a 7 días. Dosificación 0,5 g/L Cu ²⁺ , 0,2 M H ₂ SO ₄ y concentración de NaCl variado..... | 73 |
| Figura 4.12. Efecto del pH sobre la disolución de Cu a 14 días. Dosificación 0,5 g/L Cu ²⁺ , 0,2 M H ₂ SO ₄ y concentración de NaCl variado..... | 74 |
| Figura 4.13. Efecto del pH sobre la disolución de Cu a 21 días. Dosificación 0,5 g/L Cu ²⁺ , 0,2 M H ₂ SO ₄ y concentración de NaCl variado..... | 74 |
| Figura 4.14. PLS con dosificación 0,2 H ₂ SO ₄ 0,5 g/L Cu ₂ + a 35°C por 21 días..... | 75 |
| Figura 4.15. PLS con dosificación 0,2 H ₂ SO ₄ 0,5 g/L Cu ₂ + a 35°C por 21 días..... | 75 |
| Figura 4.16. Efecto de la temperatura sobre la cinética de disolución de Cu en el mineral de calcopirita a 0,5 g/L Cu ₂ +, 0,2 M H ₂ SO ₄ 100 g/L Cloruro. | 76 |
| Figura 4.17. Cálculo de constantes cinéticas (k) en el mineral de calcopirita 0,5 g/L Cu ₂ +, 0,2 M H ₂ SO ₄ 100 g/L Cloruro para distintas temperaturas. | 77 |
| Figura 4.18. Gráfico de Arrhenius para la disolución de cobre de un mineral de calcopirita entre 35 y 70 °C a 0,5 g/L Cu ₂ +, 0,2 M H ₂ SO ₄ , 100 g/L Cloruro..... | 78 |