

Índice

1	Introducción	11
1.1	Objetivo general.....	13
1.2	Objetivos específicos	13
1.3	Alcances	13
2	Revisión bibliográfica	15
2.1	Actualidad en la minería	15
2.2	Arsénico	18
2.2.1	Efectos del arsénico en la salud	19
2.2.2	Efectos ambientales del arsénico.....	20
2.3	Minerales sulfurados de cobre	21
2.3.1	Minerales sulfurados y sulfosales más comunes en la naturaleza	22
2.3.2	Enargita	22
2.3.3	Cristalografía	23
2.3.4	Química de la enargita	23
2.3.5	Génesis y localización.....	24
2.4	Hidrometalurgia	24
2.4.1	Sistemas de lixiviación.....	25
2.4.2	Lixiviación por agitación.....	27
2.4.3	Extracción por solventes, SX	29
2.5	Modelos Cinéticos	30
2.6	Lixiviación de enargita	37
2.7	Estabilidad de minerales de enargita.....	38
2.8	Lixiviación en medios clorurados	41
2.8.1	Antecedentes de Lixiviación en medio clorurado	43
2.8.2	Lixiviación de enargita en medio cloruro	44
2.9	Lixiviación de concentrados de cobre con alto contenido de arsénico	46

2.10	Presencia y estabilización del arsénico	47
3	Procedimiento experimental.....	51
3.1	Descripción de materiales y reactivos	51
3.1.1	Cloruro de sodio	51
3.1.2	Ácido sulfúrico	51
3.1.3	Hidróxido de sodio.	51
3.1.4	Aldoxima LIX 860-NIC.	51
3.1.5	Cetoxima LIX 84-IC.....	51
3.1.6	Óxido de hierro (III)	52
3.2	Equipos utilizados.....	52
3.2.1	Agitadores mecánicos	52
3.2.2	Medidor de pH	53
3.2.3	Medidor de potencial.....	53
3.2.4	Bomba de vacío	54
3.2.5	Agitadores magnéticos.....	54
3.2.6	Agitador termo calefaccionado	55
3.3	Concentrado de cobre con alto contenido de arsénico.....	56
3.3.1	Análisis químico del concentrado	56
3.3.2	Analisis mineralógico del concentrado	57
3.4	Trabajo experimental	58
3.4.1	Preparacion de soluciones lixiviantes en pruebas preliminares	58
3.4.2	Preparación de soluciones lixiviantes para Agitador termo calefaccionado	58
3.4.3	Pruebas preliminares de lixiviación.....	59
3.4.4	Pruebas en Agitador termo calefaccionado.....	61
3.4.5	Toma de muestras.....	63
3.4.6	Procedimiento para la extracción por solvente	65
3.4.7	Precipitación de arsénico	66
4	Resultados y discusiones.....	67
4.1	Resultados pruebas de lixiviación.....	67

4.1.1	Lixiviación en agitadores mecánicos con variación en la concentración de cloruro a 35°C con 2 semanas de lixiviación.....	67
4.1.2	Efecto del potencial de lixiviación en la extracción de cobre en pruebas preliminares	70
4.1.3	Efecto del pH en la extracción de cobre en pruebas preliminares	71
4.2	Resultados en agitador termo calefaccionado con variación en la concentración de cloruro a 35°C, con 2 semanas de lixiviación	72
4.2.1	Efecto del potencial de lixiviación en la extracción de cobre a 35°C, con 2 semanas de lixiviación.....	74
4.2.2	Efecto del pH en la extracción de cobre a 35°C, con 2 semanas de lixiviación.....	75
4.3	Resultados en agitador termo calefaccionado, con variación en la concentración de cloruro a 50°C, con 2 semanas de lixiviación	76
4.4	Efecto del potencial de lixiviación en la extracción de cobre a 50°C, con 2 semanas de lixiviación	78
4.4.1	Efecto del pH en la extracción de cobre a 50°C, con 2 semanas de lixiviación.....	79
4.5	Comparación en la extracción de cobre en agitadores mecánicos v/s agitador termo calefaccionado	79
4.6	Comparación del potencial de oxidación en pruebas de lixiviación en agitadores mecánicos vs agitador termo calefaccionado	80
4.7	Comparación del efecto del cloruro en pruebas de lixiviación a 35°C, en agitadores mecánicos, 2 semanas de lixiviación.....	81
4.8	Comparación del efecto de la temperatura.....	82
4.9	Resultados en la precipitación de arsénico	84
5	Conclusiones	86
6	Recomendaciones.....	88
7	Referencias	89

Índice de figuras

Figura 2.1: Principales consumidores de cobre refinado (COCHILCO, 2019).....	15
Figura 2.2: Principales productores de refinado (COCHILCO, 2019).....	16
Figura 2.3: Riñón con padecimiento de cáncer, por una exposición al arsénico.....	20
Figura 2.4: Persona, con los primeros síntomas de una exposición al arsénico.....	20
Figura 2.5: Esquema típico de un yacimiento porfídico de cobre (Velásquez, 2019).....	21
Figura 2.6: Estructura cristalina de la enargita (Ortiz, 2016).....	23
Figura 2.7: Diagrama de recirculación en la extracción de cobre.....	30
Figura 2.8: Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar (Conesa, 2002).....	31
Figura 2.9: Control de la etapa de difusión en la capa de cenizas para SCM. (Conesa, 2002).....	32
Figura 2.10: Representación de una partícula reactivo cuando la reacción química es la etapa controlante (Conesa,2002).....	34
Figura 2.11: Diagrama de Eh – pH para el sistema de cobre / agua con 1 M.....	39
Figura 2.12: Diagrama Eh-pH para el sistema arsénico/agua con 1M de especies disueltas a 25°C y presión 1bar (Kantar, 2002).....	40
Figura 2.13: Diagrama de Eh – pH para el sistema de azufre / agua con 1 M.....	41
Figura 3.1: Agitadores mecánicos en funcionamiento.....	52
Figura 3.2: Medidor de pH.....	53
Figura 3.3: Medidor de potencial de oxidación.....	54
Figura 3.4: Bomba de vacío.....	54
Figura 3.5: Agitador magnético en funcionamiento.....	55
Figura 3.6: Agitador termo calefaccionado en funcionamiento.....	55
Figura 3.7: Concentrado de cobre enargítico.....	56
Figura 3.8: Esquema demostrativo de una lixiviación en agitadores mecánicos Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 3.9: Proceso de filtrado de muestras.....	64
Figura 3.10: Vasos de muestras 20 mL.....	64
Figura 4.1: Extracción de cobre en agitadores mecánicos, usando 50 y 100 g/L de Cl, con 0.2 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación.....	67
Figura 4.2: Extracción de cobre en agitadores mecánicos, usando 50 y 100 g/L de Cl, con 0.5 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación.....	68
Figura 4.3: Extracción de cobre en agitadores mecánicos, usando 50 y 100 g/L de Cl, con 0,2 y 0.5 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación.....	69

Figura 4.4: Extracción de cobre en agitadores mecánicos, usando 50 y 100 g/L de Ct, con 0.2 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación vs potencial Eh	70
Figura 4.5: Extracción de cobre en agitadores mecánicos, usando 50 y 100 g/L de Ct, con 0.5 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación vs potencial Eh.	71
Figura 4.7: PLS, 2 semanas de lixiviación, izquierda; 50 g/L Ct con 0.2 M H ⁺ , derecha; 100 g/L Ct 0.5 M H ⁺	72
Figura 4.6: PLS, 2 semanas de lixiviación, izquierda; 50 g/L Ct con 0.5 M H ⁺ , derecha; 100 g/L Ct 0.5 M H ⁺	72
Figura 4.8: Extracción de cobre en Agitador termo calefaccionado, a 35°C, dos semanas de lixiviación.....	74
Figura 4.9: Potencial de oxidación en pruebas en agitador termo calefaccionado a 35°C, 2 semanas de lixiviación.....	75
Figura 4.10: pH en pruebas en agitador termo calefaccionado a 35°C, 2 semanas de lixiviación. .	76
Figura 4.11: Extracción de cobre en Agitador termo calefaccionado, a 50°C, dos semanas de lixiviación.....	77
Figura 4.12: Potencial de oxidación en pruebas en agitador termo calefaccionado a 50°C, 2 semanas de lixiviación.....	78
Figura 4.13: pH en pruebas en agitador termo calefaccionado a 50°C, 2 semanas de lixiviación. .	79
Figura 4.14: Extracción de cobre en agitadores mecánicos v/s agitador termo calefaccionado, usando 50 g/L de Ct, con 0.5 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación.....	80
Figura 4.15: Potencial de oxidación en agitadores mecánicos vs agitador termo calefaccionado, usando 50 g/L de Ct, con 0.5 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación.....	81
Figura 4.16: Extracción de cobre en agitadores mecánicos, usando 0, 50 y 100 g/L de Ct, con 0,2 M de H ⁺ , a 35°C, 2 semanas de lixiviación.....	82
Figura 4.17: Efecto de la temperatura sobre la cinética de disolución de Cu a 50 g/L de Ct, con 0.5 M de H ⁺	83
Figura 4.18: Gráfico de Arrhenius para la disolución de cobre desde concentrado de enargita, entre 16 y 50°C, a 50 g/L de Ct, con 0.5 M de H ⁺	84
Figura 4.19: Arsénico presente en solución antes y después de precipitar.....	85

Índice de tablas

Tabla 2.1: Producción y participación de Chile en la industria del cobre 2018 _____	18
Tabla 2.2: Composición química de los minerales sulfurados y sulfosales de cobre más comunes (Barthelmy, 2015). _____	22
Tabla 2.3: Resumen de diferentes técnicas de lixiviación de minerales (Domic, 2001) _____	26
Tabla 2.4: Ventajas y desventajas de la lixiviación por agitación en comparación con otras técnicas (Universidad de Atacama, 2015) _____	28
Tabla 2.5: Minerales típicos con presencia de arsénico (Valenzuela, 2000). _____	47
Tabla 2.6: Procesos para remoción de arsénico (Twidwell et al., 1999). _____	49
Tabla 3.1: Composición química del concentrado de cobre (%) _____	56
Tabla 3.2: Composición mineralógica de especies que contienen cobre. _____	57
Tabla 3.3: Niveles propuestos para pruebas en agitadores mecánicos _____	59
Tabla 3.4: Niveles propuestos para el primer grupo de pruebas en el agitador termo calefaccionado _____	61
Tabla 3.5: Niveles propuestos para el segundo grupo de pruebas en el agitador termo calefaccionado _____	62
Tabla 3.6: Niveles propuestos para pruebas finales de lixiviación _____	63
Tabla 4.1: Constantes cinéticas en función de la temperatura para el concentrado _____	83