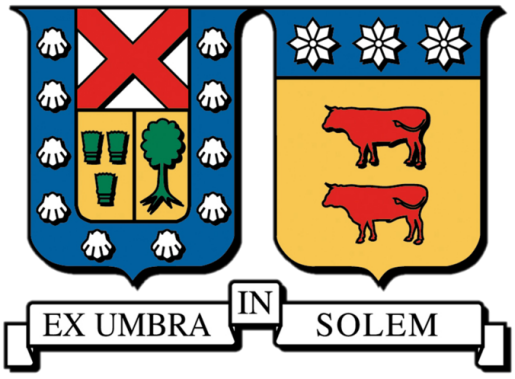
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y MATERIALES



ESTUDIO DE EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PRETRATAMIENTO DE MINERAL EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CLORURADA UTILIZANDO TEST EMELA®.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ANDRÉS ENRIQUE SILVA CONTADOR

PROFESORA GUÍA:
Dra. María Belén Barraza Sandoval

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Ing. Juan Carlos García Rivas
Dra. Sigde Karina Mamani Flores

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
FOSTER ING S.A.

SANTIAGO DE CHILE
2024

Para Eichiro Oda,
Quien semana a semana me recuerda la importancia de perseguir mis sueños.

Agradecimientos

Quiero darle las gracias a mis padres, María Eugenia y Luis, además de mis hermanos Matías y Anahis, quienes me apoyaron día a día en todo mi proceso universitario, junto a Nala, quien me apoya emocionalmente día a día. Además de mis abuelos, abuelas, tíos, tías, primos y primas.

A mi grupo de amigos de la universidad, el grupazo "Humildes USM - Usachn't" Casich, Jamiro, Zaira, Jaime, Allan, Koke, Guille, Sapo, Fran, quienes me acompañaron desde primer año en la universidad y vivimos años de momentos felices y tristes en conjunto.

Agradecer a mi amiga Helena Meneses, quien fue un gran apoyo para mi en estos últimos años de universidad, volviéndose una persona muy importante en mi vida, no solo acompañándome en mi vida académica, sino que fuera de esta también, siendo la mejor Duo de Valorant. Mucho de mi avance hasta el día de hoy es gracias a ella.

Agradecer también a más amigos que me acompañaron a lo largo de este periodo: María, Balentina, Eros, Vonny, Valentina, Darih, Mikasa, Kyami, Diego y Fer, gracias por siempre darme palabras de aliento y acompañarme.

También agradecer a mis compañeros de trabajo, con quienes forme una relación muy agradable, FOSTER no solo me permitió desarrollarme como profesional, también me permitió conocer gente profesional, dispuestos a ayudarme y proporcionarme un grato ambiente a diario.

Agradecer a mis profesores de la USM, especialmente a los profesores de laboratorio, quienes me ayudaron en el desarrollo de la presente memoria. Al profesor Dr. Jorge Ipinza, que no solo confió en mi para el desarrollo de este estudio, si no que también me permitio empezar mi vida laboral en FOSTER. A la profesora Dra. Belén Barraza, quien me ayudó a finalizar la memoria de título, y al Ing. Juan Carlos García y la Dra. Sigde Mamani que formaron parte de la comisión evaluadora de mi trabajo de título al momento de solicitárselo.

Puede que se me estén pasando algunas personas, pero agradezco a cada una de las personas quienes pasaron algún momento agradable conmigo en estos últimos años universitarios, sé que cada uno aportó en cierta medida en mi desarrollo como persona y como profesional.

Tabla de Contenido

1. Resumen **1**

2. Introducción **2**
2.1. Planteamiento del problema . . . 2
2.2. Objetivos . . . 7
2.2.1. Objetivo general . . . 7
2.2.2. Objetivos específicos . . . 7
2.3. Alcance . . . 7

3. Revisión bibliográfica **8**
3.1. Hidrometalurgia del cobre . . . 8
3.1.1. Aglomerado y curado . . . 9
3.1.2. Lixiviación . . . 10
3.1.2.1. Lixiviación en pilas . . . 11
3.1.2.2. Lixiviación por agitación . . . 11
3.2. Lixiviación en Chile . . . 12
3.3. Estudios de temperatura . . . 13
3.4. Reactor de Mezcla Trifásica (RTM®) . . . 15
3.5. Test ensayos EMELA® . . . 16

4. Metodología experimental **17**
4.1. Preparación de muestras . . . 18
4.2. Caracterización del mineral . . . 19
4.2.1. Densidad aparente . . . 19
4.2.2. Densidad real . . . 19
4.2.3. Humedad natural . . . 20
4.2.4. Humedad de impregnación . . . 21
4.2.5. Consumo estándar de ácido (CEA) . . . 22
4.2.6. Resumen de caracterización . . . 24
4.3. Preparación previa al pretratamiento . . . 24
4.3.1. Preparación NaCl . . . 24
4.3.2. Preparación de solución . . . 25
4.4. Pretratamiento de mineral . . . 26
4.4.1. Incorporación NaCl . . . 26
4.4.2. Incorporación solución lixiviante . . . 27
4.4.3. Incorporación ácido sulfúrico . . . 28
4.4.4. Reposo de mineral . . . 29
4.5. Lixiviación de mineral . . . 29

5. Resultados y Discusiones **33**
5.1. Ley de mineral . . . 33
5.2. Dosificación de ácido (V1) . . . 33
5.3. Dosificación de NaCl (V2) . . . 37
5.4. Temperatura de solución (V3) . . . 41
5.5. Tiempo de reposo (V4) . . . 44
5.6. Evaluación económica . . . 47
5.7. Parametros optimizados . . . 56

6. Conclusiones y recomendaciones **57**

7. Bibliografía **58**

Anexos **61**
A. Masa de muestras . . . 61
B. Error de propagación . . . 62
B.1. Error de propagación de densidad aparente . . . 62
B.2. Error de propagación de densidad real . . . 62
B.3. Error de propagación de densidad real promedio . . . 63
B.4. Error de propagación de humedad natural . . . 64
B.5. Error de propagación de humedad de impregnación . . . 65
B.6. Error de propagación de consumo de ácido estándar . . . 65
B.7. Error de propagación de consumo de ácido estándar promedio . . . 66
C. Volumen de ácido en ensayo de CEA . . . 67
D. Mediciones de pH y potencial REDOX . . . 70
E. Temperaturas ambiente ensayos de laboratorio . . . 73
F. Equipos . . . 74
F.1. Cortador de rifles giratorio . . . 74
F.2. Agitador mecánico . . . 74
F.3. Pulverizador . . . 75
F.4. Balanza digital (20 [kg]) . . . 76
F.5. Balanza digital (3 [kg]) . . . 76
F.6. Balanza digital (0,5 [kg]) . . . 77
F.7. Balanza analítica . . . 78
F.8. Probeta 250 [ml] . . . 78
F.9. Bomba centrifuga . . . 79
F.10. Micropipeta . . . 79
F.11. Placa calefactora . . . 80
F.12. Estufa . . . 81
F.13. Medidor de pH . . . 82
F.14. Medidor de potencial REDOX . . . 82

Índice de Tablas

3.1. Producción de cobre según su proceso de extracción (kMT de cobre fino) (COCHILCO, 2022) . . . 12
4.1. Parámetros a modificar utilizando test Emela® . . . 18
4.2. Densidad aparente para muestras M1 y M2 . . . 19
4.3. Densidad real para muestras M1 y M2 . . . 20
4.4. Humedad natural calculada para M1 y M2 . . . 21
4.5. Humedad de impregnación para muestras M1 y M2 . . . 22
4.6. Características mineral y ácido en ensayos CEA . . . 22
4.7. Resultados ensayos CEA M1 . . . 23
4.8. Resultados ensayos CEA M2 . . . 23
4.9. Caracterización de mineral y ácido . . . 24
5.1. Leyes de muestras de mineral de cabeza . . . 33
5.2. Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de ácido (V1) para muestras de mineral M1 . . . 34
5.3. Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de ácido (V1) para muestras de mineral M2 . . . 34
5.4. Medición de PLS y ripio de M1 . . . 36
5.5. Medición de PLS y ripio de M2 . . . 36
5.6. Recuperación de cobre en M1 al modificar dosificación de ácido (V1) . . . 37
5.7. Recuperación de cobre en M2 al modificar dosificación de ácido (V1) . . . 37
5.8. Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de NaCl (V2) para muestras de mineral M1 . . . 38
5.9. Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de NaCl (V2) para muestras de mineral M2 . . . 38
5.10. Medición de PLS y ripio de M1 al modificar dosificación de NaCl (V2) . . . 40
5.11. Medición de PLS y ripio de M2 al modificar dosificación de NaCl (V2) . . . 40
5.12. Recuperación de cobre en M1 al modificar dosificación de NaCl (V2) . . . 40
5.13. Recuperación de cobre en M2 al modificar dosificación de NaCl (V2) . . . 41
5.14. Parámetros utilizados en ensayos de temperatura de solución lixiviante (V3) para muestras de mineral M1 . . . 41
5.15. Parámetros Utilizados en ensayos de temperatura de solución lixiviante (V3) para muestras de mineral M2 . . . 41
5.16. Medición de PLS y ripio de M1 al modificar temperatura solución (V3) . . . 43
5.17. Medición de PLS y ripio de M2 al modificar temperatura solución (V3) . . . 43
5.18. Recuperación de cobre en M1 al modificar temperatura solución (V3) . . . 43
5.19. Recuperación de cobre en M2 al modificar temperatura solución (V3) . . . 43
5.20. Parámetros utilizados en ensayos de tiempo de reposo (V4) para muestras de mineral M1 . . . 44

5.21. Parámetros utilizados en ensayos de tiempo de reposo (V4) para muestras de mineral M2 . . . 45
5.22. Medición de PLS y ripio de M1 al modificar tiempo de reposo (V4) . . . 46
5.23. Medición de PLS y ripio de M2 al modificar tiempo de reposo (V4) . . . 46
5.24. Recuperación de cobre en M1 al modificar tiempo de reposo (V4) . . . 46
5.25. Recuperación de cobre en M2 al modificar tiempo de reposo (V4) . . . 47
5.26. Precios de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y energía eléctrica septiembre de 2024 47
5.27. Costos asociados a ácido utilizado en la mezcla inicial M1 . . . 48
5.28. Costos asociados a ácido utilizado en la mezcla inicial M2 . . . 48
5.29. Costos asociados a NaCl utilizado en la mezcla inicial M1 . . . 49
5.30. Costos asociados a NaCl utilizado en la mezcla inicial M2 . . . 49
5.31. Costos asociados a ácido utilizado en solución M1 . . . 50
5.32. Costos asociados a ácido utilizado en solución M2 . . . 50
5.33. Costos asociados a NaCl utilizado en solución M1 . . . 51
5.34. Costos asociados a NaCl utilizado en solución M2 . . . 51
5.35. Costos energéticos ensayos M1 . . . 52
5.36. Costos energéticos ensayos M2 . . . 52
5.37. Costos totales de ensayos y su respectiva recuperación de cobre para M1 . . . 53
5.38. Costos totales de ensayos y su respectiva recuperación de cobre para M2 . . . 53
5.39. Resultados de parámetros optimizados en ensayos M1 y M2 . . . 56
A.1. Masa de muestras M1 y M2 . . . 61
C.1. Volumen de ácido utilizado en prueba 1 de M1 . . . 67
C.2. Volumen de ácido utilizado en prueba 2 de M1 . . . 67
C.3. Volumen de ácido utilizado en prueba 3 de M1 . . . 67
C.4. Volumen de ácido utilizado en prueba 4 de M1 . . . 68
C.5. Volumen de ácido utilizado en prueba 1 de M2 . . . 68
C.6. Volumen de ácido utilizado en prueba 2 de M2 . . . 68
C.7. Volumen de ácido utilizado en prueba 3 de M2 . . . 69
C.8. Volumen de ácido utilizado en prueba 4 de M2 . . . 69
D.1. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de dosificación de ácido (V1) . . . 70
D.2. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 modificación de dosificación de ácido (V1) . . . 70
D.3. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de dosificación de NaCl (V2) . . . 71
D.4. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 modificación de dosificación de NaCl (V2) . . . 71
D.5. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de temperatura de solución lixiviante (V3) . . . 71
D.6. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 modificación de temperatura de solución lixiviante (V3) . . . 71
D.7. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de tiempo de reposo (V4) . . . 72
D.8. Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 Modificación de tiempo de reposo (V4) . . . 72
E.1. Temperatura ambiente para ensayos realizados en octubre de 2023 y enero de 2024 . . . 73

Índice de Ilustraciones

2.1. Perfil típico de depósito con mineralización de cobre (Griem, 2006) 3
2.2. Diagrama de proceso productivo de Pampa Camarones (Pampa Camarones, 2023) 5
3.1. Diagrama de proceso de hidrometalurgia 8
3.2. Comparación de permeabilidad de solución en mineral aglomerado y mineral sin aglomerar (Dhawan et al., 2013) 9
3.3. Representación esquemática de proceso en tambor aglomerador (Escalona, 2007) 10
3.4. Diagrama del proceso de lixiviación en pilas (Elaboración propia). 10
3.5. Esquema de la formación de una pila (Mihovilovic, 2001) 11
3.6. Diagrama lixiviación agitada (Jara, 2011) 12
3.7. Efecto de la temperatura en la lixiviación de DRT (Jo et al., 2022) 13
3.8. Efecto de la temperatura en la lixiviación (Lu et al., 2000) 14
3.9. Plano de equipo RMT (Ipinza, 2019) 15
3.10. Metodología utilizada para test EMELA® (Ipinza, 2022) 16
4.2. Ensayo consumo de ácido estándar 23
4.3. Sal pulverizada 25
4.4. Preparación de solución lixiviante 26
4.5. Mezcla de muestra mineral con sal 27
4.6. Elevación de temperatura de solución lixiviante 28
4.7. Incorporación de ácido sulfúrico a la mezcla mediante micropipeta 28
4.8. Masa mineral humectado 29
4.9. Lixiviación agitada 30
4.10. Proceso de filtrado 30
4.11. Medición de masa de ripio obtenido 31
4.12. Reducción de tamaño de muestra 31
4.13. Medición de volumen de PLS obtenido 32
4.14. Conjunto de muestras solidas y líquidas para análisis de cobre en laboratorio . 32
5.1. Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de ácido 34
5.2. Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de ácido 35
5.3. Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de ácido 35
5.4. Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de ácido 36
5.5. Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de NaCl 38
5.6. Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de NaCl 39
5.7. Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de NaCl 39
5.8. Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de NaCl 40

5.9. Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar la temperatura de solución lixiviante 42
5.10. Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar la temperatura de solución lixiviante 42
5.11. Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar el tiempo de reposo 45
5.12. Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar el tiempo de reposo 46
5.13. Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M1 54
5.14. Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M2 54
5.15. Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M1, considerando V1 y V2 55
5.16. Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M2, considerando V1 y V2 55
F.1. Cortador de rifles giratorio Universidad Técnica Federico Santa María 74
F.2. Ensayo consumo de ácido estándar 74
F.3. Pulverizador Universidad Técnica Federico Santa María 75
F.4. Balanza digital de 20 [kg] máximo Universidad Técnica Federico Santa María 76
F.5. Balanza digital de 3 [kg] máximo Universidad Técnica Federico Santa María . 77
F.6. Balanza digital de 0,5 [kg] máximo 77
F.7. Balanza analítica 78
F.8. Balanza digital de [ml] 79
F.9. Bomba centrifuga Universidad Técnica Federico Santa María 79
F.10. Micropipeta Universidad Técnica Federico Santa María 80
F.11. Placa calefactora Universidad Técnica Federico Santa María 81
F.12. Estufa de laboratorio Universidad Técnica Federico Santa María 81
F.13. Medidor de pH Universidad Técnica Federico Santa María 82
F.14. Medidor de potencial REDOX Universidad Técnica Federico Santa María . . 82

Capítulo 1

Resumen

La presente Memoria de Título tiene como objetivo estudiar los efectos de la variación de parámetros críticos en el pretratamiento de mineral de cobre durante la lixiviación clorurada, con el fin de optimizar su recuperación de cobre. Los parámetros evaluados incluyen la dosificación de ácido, la dosificación de NaCl, la temperatura de la solución aglomerante, y el tiempo de reposo, los cuales son los principales agentes involucrados en la reacción química del proceso de lixiviación, además de la facilidad de variar estos en un ambiente controlado como lo es un laboratorio pequeño. Para identificar las condiciones que maximicen la recuperación de cobre, se utilizó la metodología del Test EMELA®, que comprende la realización de cuatro series de ensayos, en las cuales se modificó de manera sistemática uno de los parámetros en cada serie. A través de este enfoque, se compararon las recuperaciones de cobre obtenidas para seleccionar la configuración óptima de cada parámetro.

Este estudio fue desarrollado en colaboración con la empresa FOSTER, quienes se encuentran en proceso de diseñar un equipo denominado "Reactor Primario", el cual tiene como finalidad mejorar el pretratamiento de mineral en el proceso de lixiviación clorurada, modificando los parámetros de dosificación de ácido, la dosificación de NaCl, la temperatura de la solución aglomerante, y el tiempo de reposo. Además, la mina Pampa Camarones mostró interés en la posible implementación de este equipo en sus operaciones.

Los resultados obtenidos no justifican la implementación del "Reactor Primario" en las operaciones de Pampa Camarones, esto debido a que, al momento de modificar los parámetros, se logró un aumento de la recuperación de 0,25 % a 1,28 % en el caso de la muestra M1 y de 0,12 % a 1,15 % en el caso de M2, siendo estas recuperaciones valores que no se pueden comparar a su recuperación actual de 82,7 %. Sin embargo, los hallazgos sirven como un precedente valioso para que FOSTER continúe investigando el desarrollo del "Reactor Primario", un equipo que permita ajustar estos parámetros de manera eficiente para maximizar la recuperación. Para avanzar en esta dirección, es necesario realizar más ensayos con un mineral menos variable y utilizando un prototipo del "Reactor Primario", el cual deberá desarrollar FOSTER.

Capítulo 2

Introducción

2.1. Planteamiento del problema

Chile es reconocido como un país minero, siendo uno de los mayores productores de cobre en el mundo, con una producción de 5.250,4 [kTM] de cobre de mina en 2023 (COCHILCO, 2024). Este mineral es procesado en Chile mediante hidrometalurgia o pirometalurgia, dependiendo principalmente del tipo de mineral de cobre que se desee tratar.

Tradicionalmente, la recuperación de óxidos de cobre se lleva a cabo mediante hidrometalurgia, un proceso que utiliza soluciones líquidas o acuosas para extraer el mineral de interés, y que incluye etapas como el pretratamiento, la lixiviación, la extracción por solventes y la electroobtención (Mihovilovic, 2001). En contraste, para los minerales sulfurados de cobre se emplea la pirometalurgia, que involucra operaciones en seco realizadas a altas temperaturas entre productos en estado sólido, líquido o gaseoso. Este proceso incluye etapas como la calcinación, la tostación, la fusión, la volatilización, la electrólisis de sales fundidas y la metalotermia (Muñoz, 2016).

Según las proyecciones de Cochilco (COCHILCO, 2017), en el año 2015, los óxidos de cobre pasarán de un 30 % a un 12 % en el año 2027, esto debido a que históricamente se han procesado óxidos de cobre mediante procesos de lixiviación, mientras que los sulfuros de cobre, se suelen procesar mediante flotación y pirometalurgia. La Figura 2.1 muestra como la zona de óxidos esta por sobre la zona de sulfuros, es decir, que al consumir la primera capa y sobrepasar el nivel freático, se necesitará seguir con la explotación de mineral sulfúrico.

El mismo estudio (COCHILCO, 2017) indica la necesidad de ocupar las instalaciones de lixiviación sumado a la necesidad de evitar procesos de fundición debido a las dificultades ambientales asociadas al proceso, como pueden ser las emisiones de: polvos metalúrgicos MP_{10} y $MP_{2,5}$ (Polvos metalúrgicos de diámetro aerodinámico menor a 10 [μm] y 2,5 [μm] respectivamente), dióxido de azufre (SO_2), arsénico (As) y mercurio (Mg) (MMA Gobierno de Chile, 2024). Estas problemáticas se presentan en diversas fundiciones, un ejemplo de esto se vio en el año 2021 cuando en la Fundición de Paipote se superó la norma de calidad del aire debido a un alza en la expulsión de dióxido de azufre, llegando a un pico de 2027,8538 [$\mu g/m^3$], siendo que la norma permite un límite de 350 [$\mu g/m^3$], que udo afectar a la comunidad de Copiapo, así como fue afectada la comunidad de Puchuncaví anteriormente por la fundición Ventanas(Verdejo, 2022).

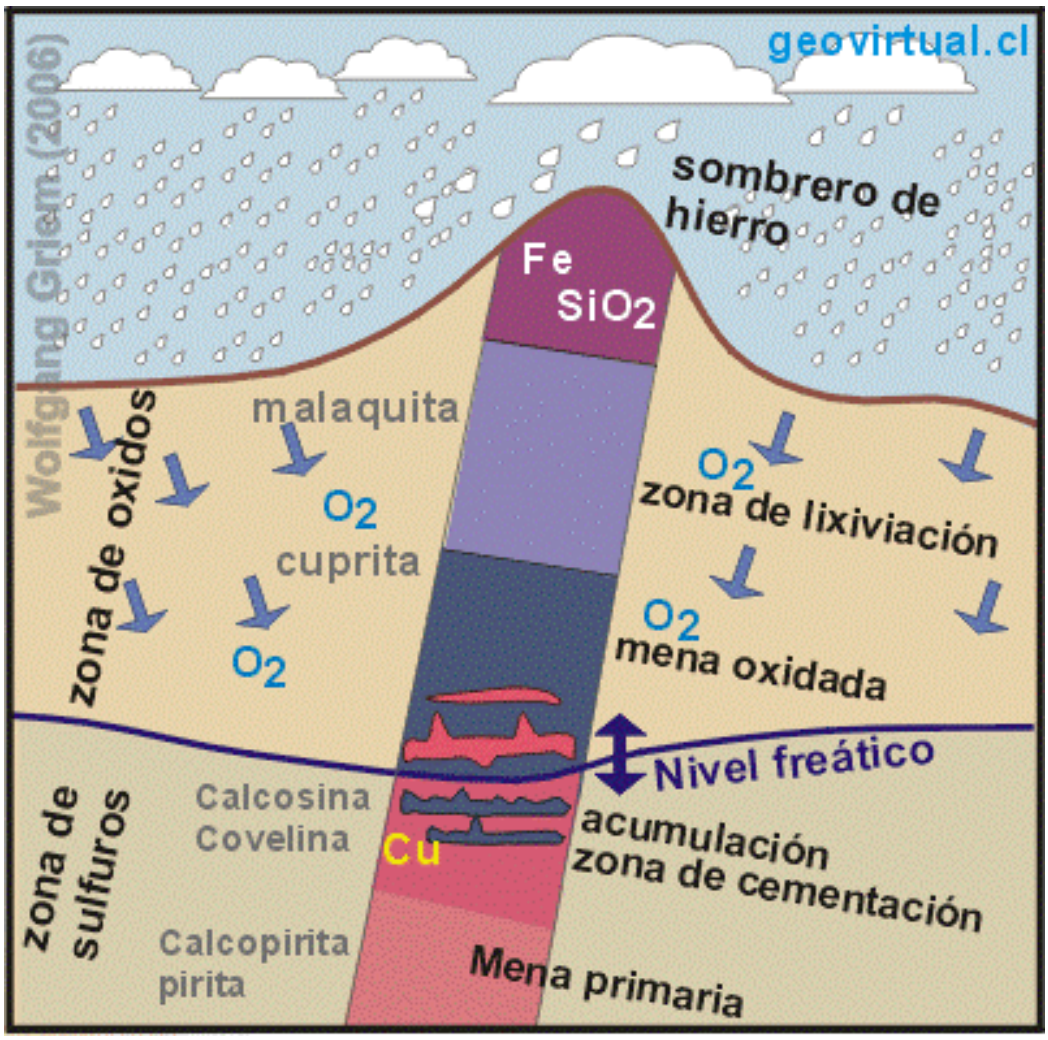


Figura 2.1: Perfil típico de depósito con mineralización de cobre (Griem, 2006)

En los últimos años han aumentado en Chile proyectos mineros de cobre utilizando lixiviación clorurada, entre estos, se pueden mencionar compañías de gran importancia como Antofagasta Minerals, CODELCO, BHP y Collahuasi (Ortiz, 2022). Mencionando también que se estudia el uso de lixiviación clorurada en sulfuros primarios, aumentando la temperatura en el proceso, llegando a los 40°C para poder lograr una recuperación óptima (Ortiz, 2022), lo que implica buscar la forma de modificar la temperatura en el proceso, a diferencia de la habitualidad donde se contempla una temperatura ambiente para esta etapa.

El proceso a evaluar surge del requerimiento de FOSTER, una empresa consultora en el ámbito de la minería que cuenta con un área de innovación tecnológica, y que busca establecer una base que justifique el inicio del desarrollo de un nuevo equipo denominado "Reactor Primario". Este equipo está diseñado para ser utilizado en el pretratamiento de mineral, modificando parámetros como la dosificación de ácido, la dosificación de NaCl, la temperatura de la solución aglomerante y el tiempo de reposo. En este contexto, la mina Pampa Camarones ha mostrado interés en la posible incorporación de este equipo a su proceso, por lo que ha establecido una alianza con FOSTER para llevar a cabo la presente memoria, con el fin de evaluar cómo afecta el pretratamiento en dos muestras de sus reservas de mineral.

Pampa Camarones es un proyecto cuprífero presente en la región de Arica y Parinacota, localizada en la comuna de Camarones aproximadamente a 80 kilómetros al sur de la ciudad de Arica (Pampa Camarones, 2023). La Planta de Cátodos Pampa Camarones está diseñada para procesar 60.000 [ton/mes] de mineral cúprico mixto, es decir, cuenta con reservas de óxidos de cobre y sulfuros de cobre, además de contar con mineral proveniente de terceros, principalmente de pequeños mineros que venden su mineral para ser procesado por Pampa Camarones. El mineral es chancado y aglomerado en un tambor aglomerador, para posteriormente ser acopiado en pilas, sobre las cuales se incorpora un sistema de riego para su lixiviación obteniendo una recuperación de cobre de 82,7 % en un periodo de 90 días. La Figura 2.2 indica el proceso dentro de las operaciones de Pampa Camarones, la cual produce un total de 8.400 [ton] de cátodos de cobre al año (Pampa Camarones, 2023).

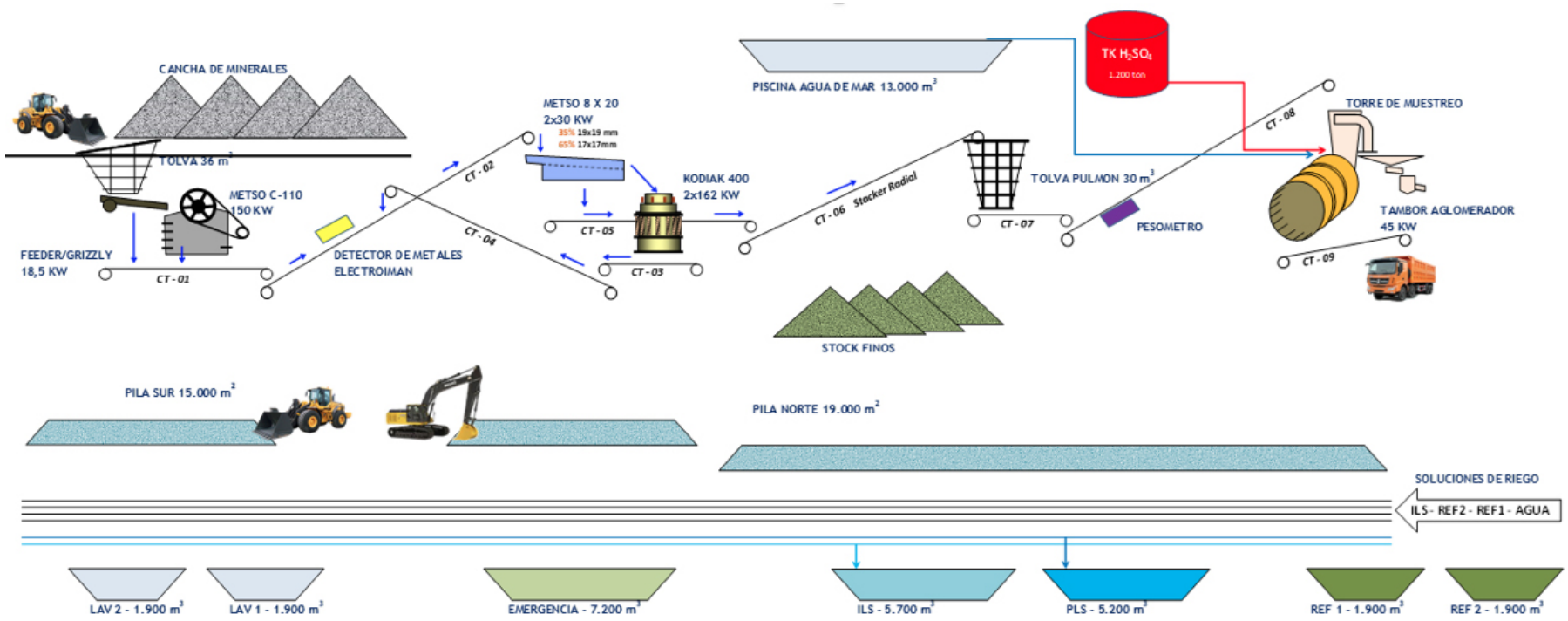


Figura 2.2: Diagrama de proceso productivo de Pampa Camarones (Pampa Camarones, 2023)

Al lixiviar sulfuros de cobre, la principal problemática radica en la baja recuperación que se obtiene, incluso al emplear lixiviación con ácido clorhídrico, que ha llegado a recuperar un 75 % de cobre, especialmente en comparación con las recuperaciones logradas en las lixiviaciones tradicionales de óxidos de cobre, la cual, considerando biolixiviación, puede llegar al 85 % de recuperación (Ipinza, 2017). Por este motivo, se ha investigado continuamente qué parámetros del proceso de lixiviación se pueden modificar para aumentar la recuperación de cobre. Esta memoria busca abordar estos mismos cuestionamientos, pero con un enfoque diferente: se realizarán ensayos modificando los parámetros involucrados en el pretratamiento del mineral. En particular, se investigará cómo mejorar la recuperación de cobre al variar factores clave en la reacción de lixiviación, como la dosificación de ácido, la dosificación de NaCl, la temperatura de la solución y el tiempo de reposo.

La mina Pampa Camarones está interesada en el desarrollo de una nueva metodología para el proceso de aglomerado y curado, el cual permita especificar las características del proceso, dependiendo de las características del mismo mineral, es decir, busca que el proceso sea optimizado para cada una de sus muestras minerales específicas, con el objetivo de aumentar la recuperación de cobre obtenido, lo que podría implicar un aumento en las ganancias que percibe Pampa Camarones.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Estudiar, a través de un desarrollo experimental en laboratorio, el efecto sobre la recuperación de cobre en dos muestras de mineral de Pampa Camarones al modificar los parámetros involucrados en la lixiviación clorurada: la dosificación de ácido, la dosificación de NaCl, la temperatura de la solución y el tiempo de reposo.

2.2.2. Objetivos específicos

- Definir una metodología para desarrollos experimentales respecto sobre estudios de pretratamiento de mineral en lixiviación clorurada.
- Caracterizar el mineral proporcionado por Pampa Camarones, identificando sus propiedades clave: densidad aparente, humedad natural, humedad de impregnación, densidad del mineral y consumo estándar de ácido.
- Evaluar la viabilidad técnico-económica que justifique el diseño de un reactor primario para el pretratamiento de minerales por parte de FOSTER, considerando los parámetros de estudio planteados.

2.3. Alcance

La presente memoria solo estudiará los parámetros de; dosificación de ácido, dosificación de NaCl, temperatura de solución y tiempo de reposo, considerando un mineral entregado por Pampa Camarones. Por lo que el estudio de otros parámetros y en minerales de diversas procedencias, quedan fuera del alcance de esta memoria y pueden ser realizados en una continuación de la misma o un estudio posterior.

Capítulo 3

Revisión bibliográfica

3.1. Hidrometalurgia del cobre

La hidrometalurgia corresponde a una rama de la metalurgia extractiva que busca recuperar minerales de interés mediante el uso de soluciones líquidas o acuosas. Se desarrolla en tres etapas físico-químicas, iniciando con la lixiviación, la cual es el proceso de disolución selectiva de los metales mediante la utilización de una solución acuosa, el proceso continúa en la concentración, la cual es una etapa de procesamiento y transformación de metales disueltos en el medio acuoso de lixiviación, finalizando en la etapa de precipitación, en las cuales se logra la recuperación selectiva de los metales valiosos, los cuales se encuentran disueltos en el medio acuoso (Mihovilovic, 2001), como se ven en la Figura 3.1. El producto de este proceso es una solución rica en mineral valioso, denominado Pregnant Leach Solution, desde ahora PLS, además de obtener un residuo denominado ripio, el cual corresponde al sólido que no fue disuelto por el agente lixiviante.

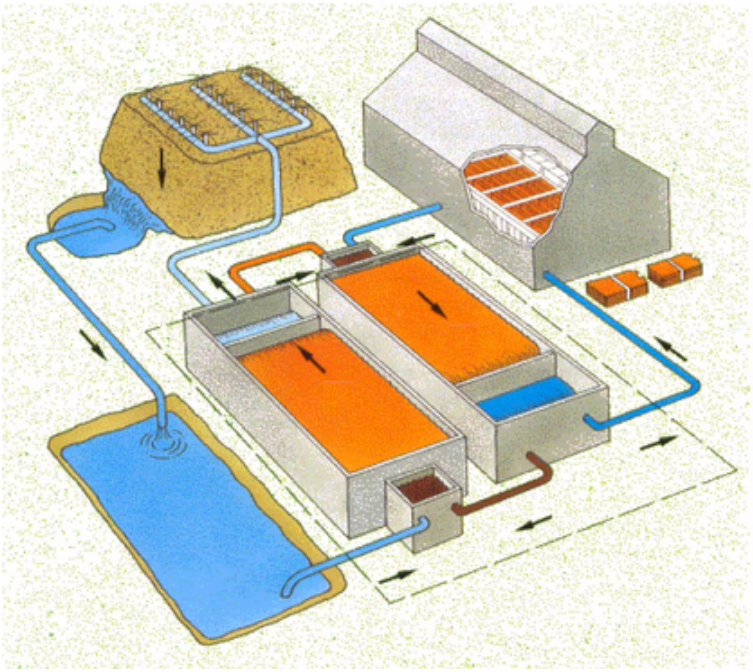


Figura 3.1: Diagrama de proceso de hidrometalurgia

3.1.1. Aglomerado y curado

La aglomeración es el proceso de consolidación de partículas sólidas en estructuras más grandes a través de la agitación, sin necesidad de aplicar presión mecánica (Bouffard, 2004). Este paso ofrece la oportunidad de aplicar la solución lixiviante antes de la construcción de la pila y el inicio del proceso de lixiviación, lo que mejora la velocidad del proceso. Además, la unión de partículas pequeñas a las grandes, a través de puentes líquidos, permite formar pilas uniformemente permeables (Dhawan et al., 2013). Como se muestra en la Figura 3.2, donde se puede ver como el mineral aglomerado evita la segregación y migración de finos, resultando en una mejor respuesta en el proceso de lixiviación (Chamberlin, 1986).

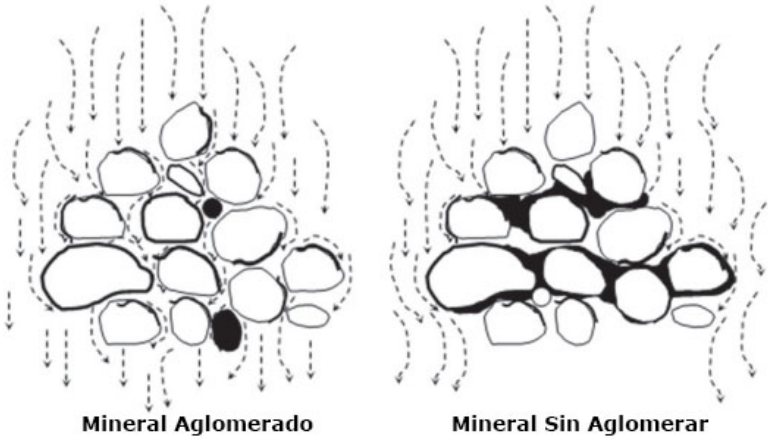


Figura 3.2: Comparación de permeabilidad de solución en mineral aglomerado y mineral sin aglomerar (Dhawan et al., 2013)

Por otro lado, el curado logra inhibir la disolución de impurezas, además de acelerar la extracción de cobre, esto debido a que se genera un cambio de estructura de los hidróxidos, volviendo la superficie hidrofóbica e insoluble en soluciones acuosas, lo que permite la distribución del ácido en el lecho del mineral (Jasen & Taylor, 2003).

En la industria, ocasionalmente se utiliza un proceso de aglomerado y curado por correas, proceso en el cual se agrega agua y ácido directamente sobre el mineral, teniendo el inconveniente de que no existe una buena mezcla ni una dosificación homogénea (Escalona, 2007). La solución a esta problemática es la utilización de un tambor aglomerador (Figura 3.3), el cual utiliza un mecanismo de rotación.

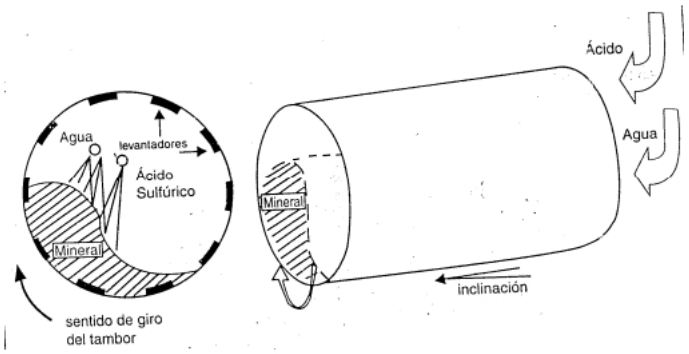


Figura 3.3: Representación esquemática de proceso en tambor aglomerador (Escalona, 2007)

3.1.2. Lixiviación

Existen diversos procesos de lixiviación, cuya elección depende principalmente de las características del mineral. Entre los tipos de lixiviación más comunes se encuentran: lixiviación en pilas, lixiviación in situ, lixiviación en bateas, lixiviación en botaderos y lixiviación en tanques agitados, entre otros. A pesar de sus diferencias, todos estos procesos tienen como resultado la obtención de una solución rica en minerales valiosos, conocida como PLS como se muestra en la Figura 3.4, que será procesada en las etapas posteriores para extraer el mineral de interés. A continuación, se describirán algunos de estos procesos.

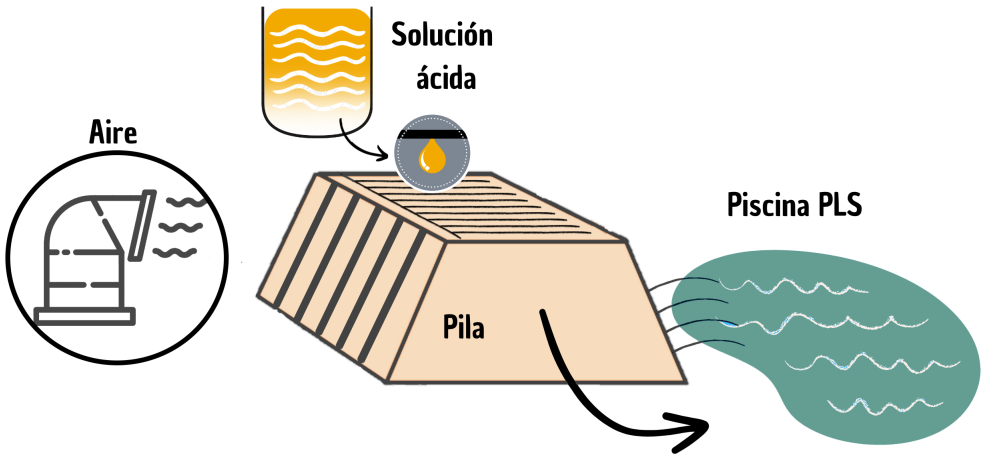


Figura 3.4: Diagrama del proceso de lixiviación en pilas (Elaboración propia).

3.1.2.1. Lixiviación en pilas

Este proceso se caracteriza por la trituración intensiva a la que se someten los minerales, en comparación con otros métodos de lixiviación, alcanzando tamaños de partícula entre 1,50 y 0,75 pulgadas. Luego, el mineral pasa por un pretratamiento de aglomerado y curado, tras lo cual se forma una pila rectangular (Figura 3.5) que es regada con una solución ácida mediante aspersores. La solución rica en cobre, resultante de este proceso, se recoge en la base de la pila (Beckel, 2000). La lixiviación en pilas es usada en diversos yacimientos, entre los cuales podemos encontrar a Pampa Camarones, siendo este, el método que utilizan actualmente para el proceso de lixiviación de mineral.

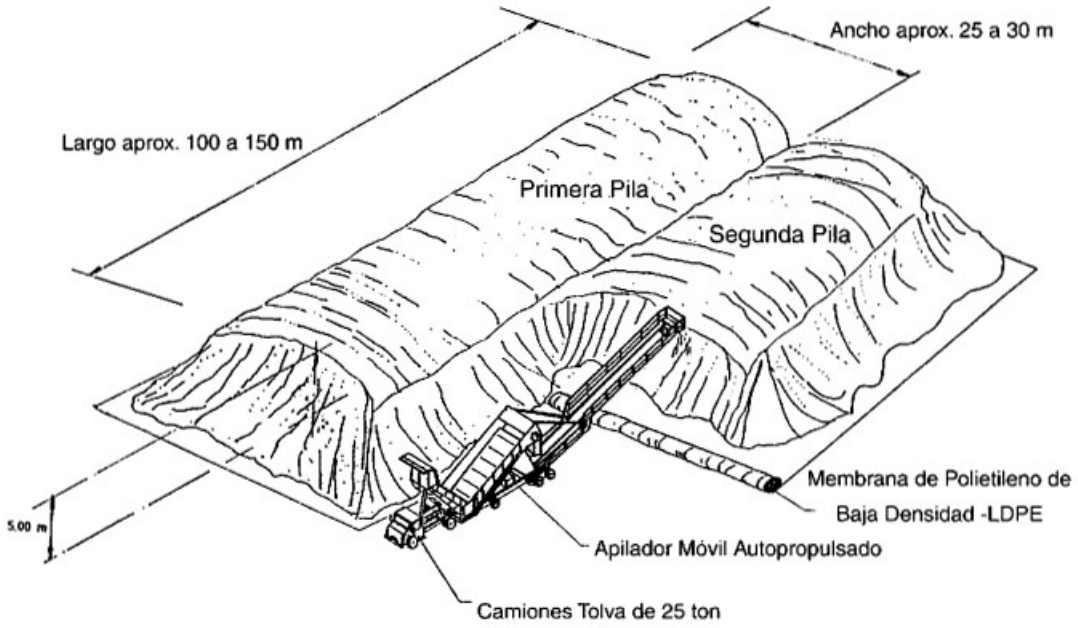


Figura 3.5: Esquema de la formación de una pila (Mihovilovic, 2001)

3.1.2.2. Lixiviación por agitación

Este proceso consiste en la agitación de pulpa de mineral dentro de un recipiente (Figura 3.6), lo que permite controlar diversos factores que aceleran la cinética química, como la agitación, la temperatura, la presión de gases y el uso de reactivos (Mihovilovic, 2001). Gracias a esta técnica, es posible alcanzar altas recuperaciones en tiempos reducidos. Además, puede realizarse de manera intermitente, continua, en contracorriente o continua en paralelo ((Jara, 2011).

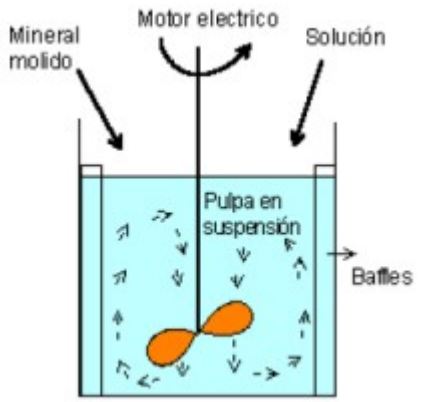


Figura 3.6: Diagrama lixiviación agitada (Jara, 2011)

Dado que este proceso opera en un periodo de horas, resulta especialmente atractivo para pruebas experimentales, en contraste con otros métodos como la lixiviación en pilas, que requieren varios meses para completarse.

3.2. Lixiviación en Chile

En Chile es común la utilización de la hidrometalurgia para la extracción de minerales, tal como muestra la Tabla 3.1, se puede observar la tendencia a producir cátodos de cobre productos de los procesos de extracción por solvente y electroobtención, es decir, los últimos procesos que se contemplan en el proceso de hidrometalurgia. Además de esto, en las mineras nacionales el método de lixiviación en pilas es el más usual para la extracción de cobre para especies minerales de óxidos de cobre, utilizando como agente lixiviante el ácido sulfúrico (COCHILCO, 2022).

Tabla 3.1: Producción de cobre según su proceso de extracción (kMT de cobre fino) (COCHILCO, 2022)

Cobre por producto	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**
Producción de mina	5,503.5	5,831.6	5,787.4	5,733.1	5,624.9	5,330.5
Producción de fundición	1,264.6	1,246.1	1,011.2	1,206.3	1,206.6	1,112.4
Producción de refinado	2,429.5	2,461.2	2,269.1	2,329.3	2,274.0	2,149.1
Cátodos SX-EW	1,586.2	1,575.3	1,580.2	1,467.5	1,414.4	1,414.6
Refinado a fuego	843.3	885.9	688.9	861.8	859.6	734.5
Cátodos ER	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Minerales como la calcopirita, un sulfuro de cobre con contenido de hierro, tienen una cinética lenta, del orden de años, al ser procesadas utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) en la hidrometalurgia, a diferencia de los óxidos de cobre que suelen tardar horas en el proceso (Quipe, 2014). Es por este motivo que la industria minera en Chile utiliza métodos de extracción pirometalurgicos para este tipo de minerales.

En los últimos años, se ha planteado la lixiviación clorurada como una solución a esta problemática, permitiendo aplicar la hidrometalurgia en minerales de sulfuro de cobre primario de baja ley, tales como calcopirita, bornita y de enargita (Ipinza, 2023).

3.3. Estudios de temperatura

Estudios han demostrado que un aumento en la temperatura de la solución mejora significativamente el porcentaje de extracción del mineral. Según (Jo et al., 2022), a temperatura ambiente se puede alcanzar una extracción del 38 %; sin embargo, al aumentar la temperatura de lixiviación a 45°C, la extracción puede llegar al 70 % en solo 115 minutos, mejorando considerablemente la eficiencia del proceso, como se ve en la Figura 3.7. Además, los estudios de (Lu et al., 2000)muestran que es posible lograr una extracción cercana al 90 % a 95°C. Estos estudios también destacan que a mayor temperatura, menor es el tiempo de reposo necesario para completar el proceso de lixiviación, optimizando aún más el rendimiento, como se puede ver en el gráfico de la Figura 3.8. El aumento de la temperatura está asociado al consumo de energía, lo cual debe ser planificado cuidadosamente, considerando cómo se generará dicha energía y a qué costo.

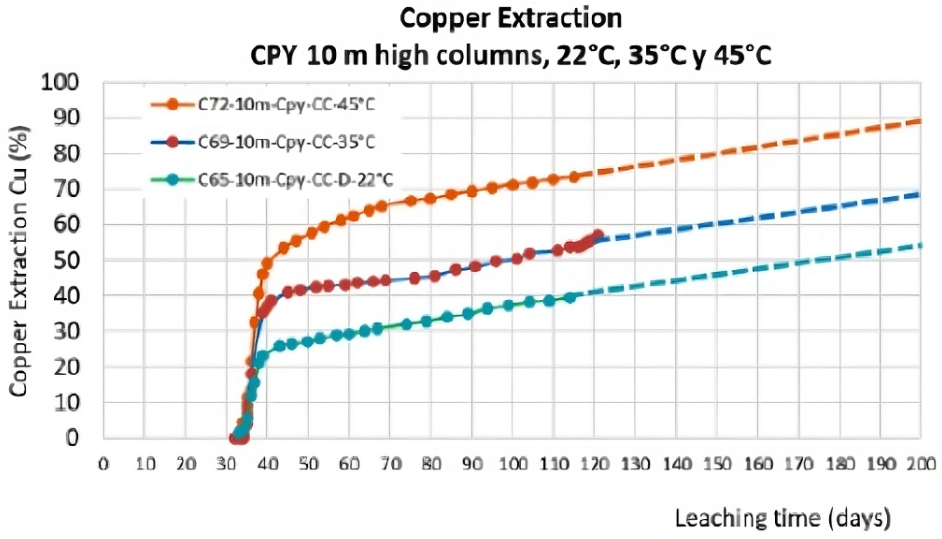


Figura 3.7: Efecto de la temperatura en la lixiviación de DRT (Jo et al., 2022)

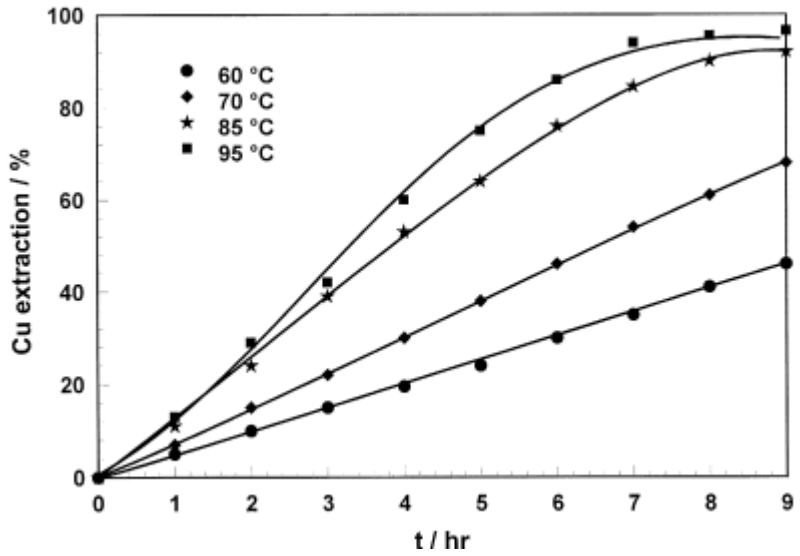


Figura 3.8: Efecto de la temperatura en la lixiviación (Lu et al., 2000)

3.4. Reactor de Mezcla Trifásica (RTM®)

Antes de la presente memoria, se diseñó un equipo destinado a mejorar el proceso de pretratamiento en hidrometalurgia. FOSTER ahora busca avanzar en el desarrollo de este equipo, adaptándolo para su aplicación en el proceso de lixiviación clorurada. El Reactor de Mezcla Trifásica (RTM®) es un equipo similar al tambor aglomerador, que tiene como función recircular los gases de HCl en el proceso de aglomerado y curado, aumentando la extracción de cobre, sumado a eliminar la emisión de gases (Ipinza, 2019). El reactor se separa en 4 etapas, como se muestra en la Figura 3.9, donde ocurren distintos fenómenos (González, 2016):

1. Alimentación: Ingresa el mineral mezclado previamente con sal.
2. I Cámara: Se ingresa refino y los gases recirculados.
3. II Cámara: Se ingresa el ácido sulfúrico, en donde ocurre la reacción con sal.
4. Captador de gases: Los gases ricos en ácido clorhídrico circulan a través de un extractor de gases.

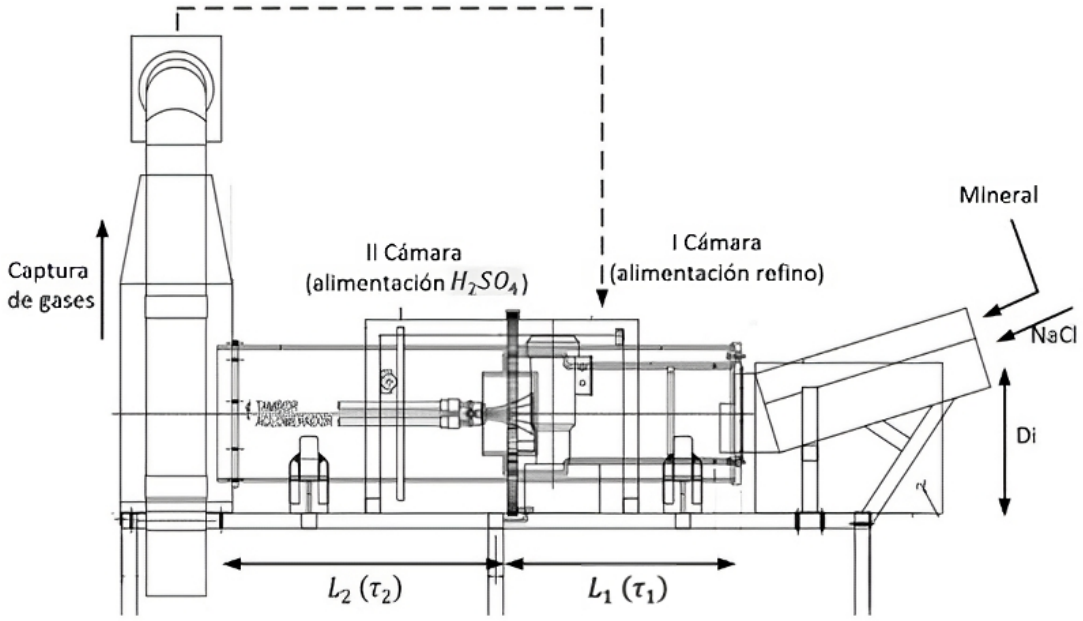


Figura 3.9: Plano de equipo RMT (Ipinza, 2019)

3.5. Test ensayos EMELA®

En los laboratorios del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), los profesores Dr. Jorge Ipinza y el Dr. Juan Ibañez, desarrollaron una técnica experimental denominada **Extracción Máxima de Especies por Lixiviantes Agresivos** (EMELA®), técnica que tiene como objetivo el determinar la máxima extracción de cobre desde minerales refractarios (óxidos complejos y sulfuros minerales y sus concentrados) a la lixiviación ácida convencional (Ipinza, 2022).

Este método ha sido utilizado en varias ocasiones con tal de determinar la máxima extracción de cobre con una metodología definida como muestra la Figura 3.10 (Ipinza, 2018).

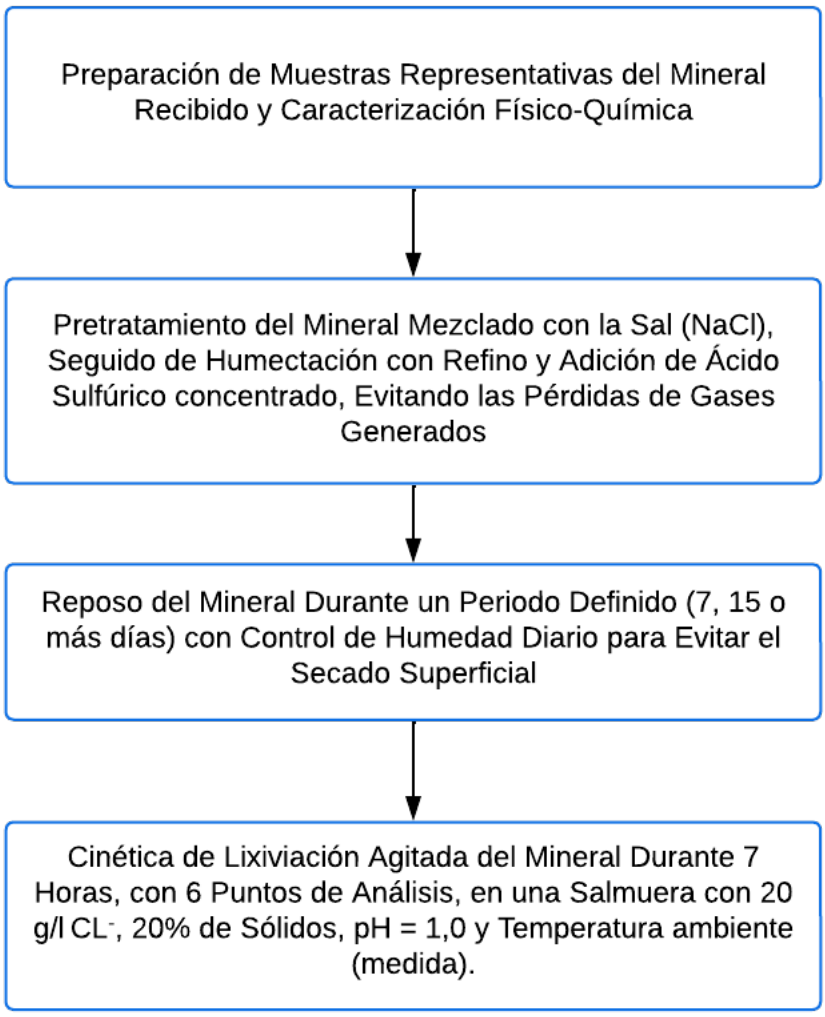


Figura 3.10: Metodología utilizada para test EMELA® (Ipinza, 2022)

En la presente memoria, se seguirá la base del test EMELA®, aplicando modificaciones según los intereses del estudio. Estos cambios serán detallados en el Capítulo 4.

Capítulo 4

Metodología experimental

Esta memoria de título estudiará el efecto de la modificación de los parámetros en el proceso de aglomerado y curado sobre la recuperación de mineral. Para ello, se utilizará el test EMELA®, una técnica experimental desarrollada por el Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM) de la Universidad Técnica Federico Santa María. El nombre de esta técnica proviene de las iniciales de "Extracción Máxima de Especies por Lixiviantes Agresivos". El test será aplicado en muestras de mineral facilitadas por la mina Pampa Camarones, quienes, en conjunto a la empresa auspiciante FOSTER, están interesados en conocer los efectos de diversos parámetros presentes en el proceso de aglomeración y curado. Esto con el fin de poder aumentar la recuperación de cobre en el proceso de lixiviación clorurada, la cual, como se mencionó en la introducción, corresponde a 82,7 %.

Para la realización del test EMELA® se deben realizar previamente ensayos de caracterización de mineral, los cuales consisten en; ley de mineral, densidad real, densidad aparente, humedad natural, humedad de impregnación y consumo específico de ácido. Con estos valores, se realiza el test EMELA®, donde los parámetros a estudiar son; dosificación de ácido V1 (30 %, 50 %, 70 % y 100 %), dosificación de NaCl V2 (5 %, 15 % y 25 %), temperatura de solución V3 (ambiente, 20°C y 40°C) y tiempo de reposo V4 (4, 15 y 25 días). Esto se realizará con 2 muestras con un total de 15 ensayos únicos, es decir, sin duplicados ni triplicados debido a la cantidad de mineral entregado por Pampa Camarones, como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros a modificar utilizando test Emela®

Nº Exp	**V1 %**	**V2 %**	**V3 [°C]**	**V4 días**
1	30	15	ambiente	15
2	50	15	ambiente	15
3	70	15	ambiente	15
4	100	15	ambiente	15
5	Mejor resultado V1	5	ambiente	15
6		25	ambiente	15
7		Mejor Resultado V2	25	15
8			40	15
9			Mejor Resultado V3	4
10				25

Una vez se realiza el aglomerado y curado, además de la lixiviación que contempla el test EMELA®, se realiza una separación de sólido/líquido, el producto de esta separación será enviado a un laboratorio externo para realizar un análisis químico de Cu y Fe para estudiar la recuperación de cobre.

4.1. Preparación de muestras

Los equipos utilizados para los ensayos de la presente memoria están ubicados en el laboratorio de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad Técnica Federico Santa María, tanto en el laboratorio de preparación de muestras, laboratorio de procesamiento de minerales y planta piloto. Estos equipos, esenciales para llevar a cabo las pruebas experimentales, se encuentran detalladamente descritos en el Anexo F, donde se proporciona información sobre sus características técnicas.

Minera Pampa Camarones entrega para el desarrollo de la presente memoria 5 [Kg] de dos muestras de mineral, los cuales deben ser sometidos a un proceso de selección de muestra. Para esto se utilizará un cortador de rifles giratorio. Previo a este procedimiento, se realiza un roleo del total de mineral, utilizando una cubierta de plástico, roleando 10 veces el mineral. Posterior a esto, se utilizará el cortador de rifles giratorio Figura F.1, el cual cuenta con 20 depósitos y es necesario obtener muestras de 200 [g], es por este motivo que se realizará el siguiente procedimiento:

1. Se depositan los 5 [kg] de mineral previamente roleado al interior del cortador de rifles giratorio, obteniendo 20 muestras de 250 [g] cada una.

2. Se seleccionan 4 depósitos de forma cruzada, es decir, se selecciona un depósito de manera aleatoria, posteriormente se selecciona el depósito que se encuentra cruzado a este, para luego seleccionar los 2 depósitos equidistantes entre ellos. Este kilogramo de muestra es almacenado de forma momentánea, esto con el objetivo de obtener muestras de 200 [g] cada una.

3. Se mezclan los 4 [kg] restantes y vuelve a ser introducido al cortado de rifles, obteniendo

20 muestras de 200 [g]. Se retira el mineral de cada depósito, midiendo su masa y siendo almacenado en bolsas de plástico etiquetadas.

4. Se deposita el kilogramo de mineral anteriormente almacenado al interior del cortador de rifles giratorio, obteniendo 50 [g] de mineral en cada depósito.

5. Se toma uno de estos depósitos de forma aleatoria, además de seleccionar el depósito cruzado y los depósitos equidistantes y se mezclan, se mide la masa de dicha mezcla para posteriormente ser almacenada y etiquetada, este procedimiento se repite una segunda vez. El resto de las muestras se mezcla y es depositado.

6. Se almacenan las 22 muestras medidas (Tabla A.1).

4.2. Caracterización del mineral

4.2.1. Densidad aparente

La densidad aparente de un mineral está definida como la masa de un mineral sobre un volumen conocido, considerando espacios vacíos y poros generados de forma natural (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023). Para medir este parámetro, se siguen los pasos del protocolo (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023) y se realizan los siguientes pasos:

1. Se masa mineral a utilizar para ensayo, considerando un error instrumental de la balanza digital de ± 0,01 [g] (Anexo F.5).

2. Se agrega mineral a una probeta y se mide el volumen ocupado, considerando un error instrumental de la probeta de ± 1 [ml] (Anexo F.8).

3. Se asume que la probeta tiene forma cilíndrica y se utiliza la Ecuación 4.1, considerando un error de propagación (Anexo B.1).

$$\rho_a = \frac{m_{sólido}}{V_{ocupadoenrecipiente}} \tag{4.1}$$

La Tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos para la muestra M1 y M2 siguiendo los procedimientos descritos y la Ecuación 4.1.

Tabla 4.2: Densidad aparente para muestras M1 y M2

Parametro	M1	M2
Masa [g]	16,80±0,01	13,80±0,01
Volumen [ml]	20,0±1	20,0±1
Densidad [ton/m^3]	0,84±0,04	0,69±0,03

4.2.2. Densidad real

La densidad real busca reflejar la masa de mineral sobre un volumen sin consideración de vacíos o de poros (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023), es por este motivo que se debe realizar una serie de pasos para poder obtener este valor. Para medir

este parámetro, se siguen los pasos del protocolo (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023) y se realizan los siguientes pasos:

1. Medir masa de picnómetro vacío (m_1), considerando un error instrumental de la balanza digital de ± 0,0001 [g] (Anexo F.7).
2. Mediar masa de picnómetro con mineral cubriendo la base de picnómetro (m_2).
3. Medir masa de mineral con mineral mezclado con agua destilada hasta cubrir picnómetro por completo (m_3).
4. Medir masa de picnómetro lleno de agua destilada (m_4).
5. Calcular densidad real utilizando la Ecuación 4.2, considerando un error de propagación (Anexo B.2 y Anexo B.3).

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \tag{4.2}$$

La Tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos para la muestra M1 y M2 siguiendo los procedimientos descritos y la Ecuación 4.2, en este caso, debido a la complejidad de este desarrollo, con tal de disminuir los errores experimentales, se hacen las mediciones en duplicado, por lo que se considera el promedio entre ambos resultados.

Tabla 4.3: Densidad real para muestras M1 y M2

Parametro	M1 Duplicado 1	M1 Duplicado 2	M2 Duplicado 1	M2 Duplicado 2
Masa 1 [g]	19,4948±0, 0001	20,2283±0, 0001	19,2247±0, 0001	18,1837±0, 0001
Masa 2 [g]	20,4575±0, 0001	21,3018±0, 0001	20,5505±0, 0001	19,5267±0, 0001
Masa 3 [g]	45,0505±0, 0001	45,5806±0, 0001	44,6321±0, 0001	46,6033±0, 0001
Masa 4 [g]	44,4771±0, 0001	44,9244±0, 0001	43,7560±0, 0001	45,7091±0, 0001
Densidad [ton/m]	2,5000±0, 13	2,5714±0, 13	2,9482±0, 13	2,9924±0, 14
Densidad promedio [ton/m]	2,5357±0, 0009		2,9703±0, 0010	

4.2.3. Humedad natural

La humedad natural es el parámetro que indica cuánto es el porcentaje de agua que posee el mineral al momento de ser extraído (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023). Para medir este parámetro, se siguen los pasos del protocolo (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023) y se realizan los siguientes pasos:

1. Masar 100 [g] de mineral (m_1), considerando un error instrumental de la balanza digital de ± 0,01 [g] (Anexo F.5).
2. Masar el vidrio reloj donde se encuentra depositado.
3. Introducir el mineral a la estufa y establecer una temperatura de 105°C.
4. Pasado 5 horas, sacar el mineral de la estufa y medir masa de mineral restando la masa que aporta el vidrio reloj (m_2).

5. Calcular humedad natural utilizando la Ecuación 4.3, considerando un error de propagación (Anexo B.4).

$$H_N = \frac{m_1 - m_2}{m_2} x100 \tag{4.3}$$

La Tabla 4.4 muestra los resultados obtenidos para la muestra M1 y M2 siguiendo los procedimientos descritos y la Ecuación 4.3

Tabla 4.4: Humedad natural calculada para M1 y M2

Parametro	M1	M2
Masa mineral seco [g] (m1)	100,01±0,01	100,00±0,01
Masa mineral natural [g] (m2)	98,42±0,01	98,91±0,01
Humedad natural %	1,07±0,01	0,75±0,01

4.2.4. Humedad de impregnación

La humedad de impregnación tiene relación con el líquido que puede retener un material luego de ser regado y filtrado (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023). Para medir este parámetro, se siguen los pasos del protocolo (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023) y se realizan los siguientes pasos:

1. Masar 100 [g] de mineral (m_2), considerando un error instrumental de la balanza digital de ± 0,01 [g] (Anexo F.7).
2. Doblar papel filtro y humedecerlo, dejar escurrir el mineral por 30 minutos.
3. Masar el filtro húmedo y bandeja metálica que la contiene para medir.
4. Se agregan los 100 [g] de mineral a un vaso precipitado con 300 [ml] de agua destilada y se vierte sobre un embudo cubierto por el papel filtro.
5. Se deja destilando el mineral por 5 horas como se ve en la Figura 4.1.
6. Se masa el papel filtro con el mineral húmedo y bandeja metálica, restando la cantidad que ya se había medido para obtener solo la masa de mineral húmedo (m_1).
7. Calcular la humedad de impregnación utilizando la Ecuación 4.4, considerando un error de propagación (Anexo B.4).

$$H_I = \frac{m_1 - m_2}{m_2} x100 \tag{4.4}$$

Figura 4.1: Ensayo humedad de impregnación

La Tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para la muestra M1 y M2 siguiendo los procedimientos descritos y la Ecuación 4.4.

Tabla 4.5: Humedad de impregnación para muestras M1 y M2

Parametro	M1	M2
Masa mineral húmedo [g] (m1)	137,61±0,01	145,06±0,01
Masa mineral natural [g] (m2)	100,00±0,01	100,00±0,01
Humedad de impregnación %	37,61±0,01	45,06±0,01

4.2.5. Consumo estándar de ácido (CEA)

El consumo de ácido se define como los kilogramos de ácido que se utilizan por tonelada de mineral (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023), es decir, este valor es el que se requiere conocer para establecer el porcentaje de ácido involucrado en la reacción química. Para medir este parámetro, se siguen los pasos del protocolo (Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, 2023) y se realizan los siguientes pasos:

1. Masar 50 [g] de mineral, considerando un error instrumental de la balanza digital de ± 0,01 [g] (Anexo F.7).
2. Agregar 450 [ml] de agua destilada en un vaso precipitado y agregar mineral, considerando un error instrumental de la probeta de ± 2,5 [ml] (Anexo F.8).
3. Se utiliza un agitador mecánico y se mide el pH de la pulpa mediante un pH-metro, como se ve en la Figura 4.2.
4. Se registra el pH de la pulpa y se agrega ácido sulfúrico (midiendo el volumen agregado), considerando un error instrumental del medidor de pH de ± 0,01 [g] (Anexo F.13).
5. Se registra el menor pH alcanzado y el máximo pH alcanzado (cuando se estabiliza).
6. Se repite el procedimiento hasta que la medición mínima y máxima no se diferencien más de 0,2 puntos.
7. Se calcula el CEA utilizando la Ecuación 4.5, considerando un error de propagación (Anexo B.6 y Anexo B.7).

$$CEA = \frac{V_{ácido} - \rho_{ácido}}{m_{mineral}} x100 \tag{4.5}$$

Se realizan los diversos ensayos considerando los datos de la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Características mineral y ácido en ensayos CEA

Masa mineral ([g]	densidad de ácido [g/ml]	Pureza de ácido %
50,00 ±0,01	1,84	98

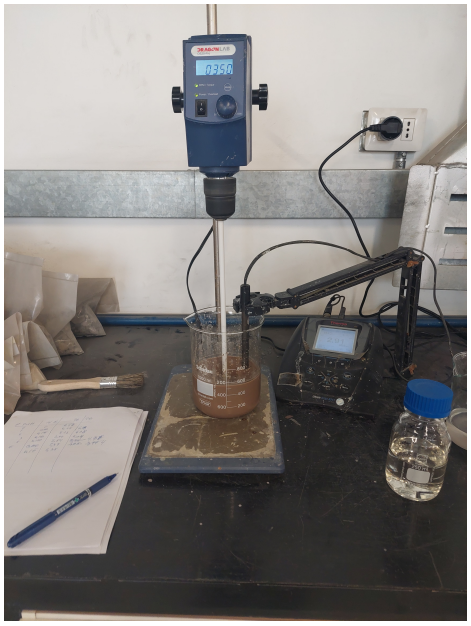


Figura 4.2: Ensayo consumo de ácido estándar

Se mide el volumen de ácido utilizado hasta alcanzar un pH estabilizado, es decir, el volumen requerido hasta que el pH de la solución no varíe en más de 0,2 puntos, como se indica en el Anexo C.

La Tabla 4.7 y Tabla 4.8 muestran los resultados de los ensayos CEA y sus promedios.

Tabla 4.7: Resultados ensayos CEA M1

Ensayo	Volumen de ácido total [ml]	CEA [kg/t]
Prueba 1	1,050 $\pm 0,001$	37,87 $\pm 0,05$
Prueba 2	0,750 $\pm 0,001$	27,05 $\pm 0,03$
Prueba 3	0,900 $\pm 0,001$	32,46 $\pm 0,04$
Prueba 4	0,750 $\pm 0,001$	27,05 $\pm 0,03$
CEA promedio	31,11 $\pm 0,02$	

Tabla 4.8: Resultados ensayos CEA M2

Ensayo	Volumen de ácido total [ml]	CEA [kg/t]
Prueba 1	1,050 $\pm 0,001$	37,87 $\pm 0,05$
Prueba 2	1,150 $\pm 0,001$	41,74 $\pm 0,06$
Prueba 3	1,000 $\pm 0,001$	36,06 $\pm 0,04$
Prueba 4	1,050 $\pm 0,001$	37,87 $\pm 0,05$
CEA promedio	38,32 $\pm 0,03$	

4.2.6. Resumen de caracterización

La Tabla 4.9 muestra el resumen de la caracterización que se utilizará en las muestras M1 y M2.

Tabla 4.9: Caracterización de mineral y ácido

Parámetro	Unidad	M1	M2
Densidad aparente	t/m^3	0,84 $\pm 0,04$	0,69 $\pm 0,01$
Humedad natural	%	1,07 $\pm 0,01$	0,75 $\pm 0,01$
Humedad de impregnación	%	137,61 $\pm 0,01$	145,06 $\pm 0,01$
Granulometría mineral	100 %	Malla 100	Malla 100
Densidad del mineral	t/m^3	2,5357 $\pm 0,0009$	2,9703 $\pm 0,0010$
Pureza del ácido	%	98	98
Densidad del ácido	g/ml	1,84	1,84
Porcentaje de sólidos	%	50	50
Consumo estándar de ácido	kg/t	31,11 $\pm 0,02$	38,32 $\pm 0,03$

4.3. Preparación previa al pretratamiento

4.3.1. Preparación NaCl

Se debe preparar la sal a utilizar, por lo que se toman las muestras de sal gruesa presentes en el laboratorio de preparación de muestras del departamento de minería de la UTFSM y se pulveriza.

1. Se masan 200 [g] de sal.
2. Se agrega al recipiente de pulverizador.
3. Se ajustan 8 bar de presión de aire y 90 segundos en el equipo de pulverización.
4. Se inserta el recipiente en el equipo y se da inicio.
5. Se quita el recipiente y se extrae la sal pulverizada, la cual tendrá un tamaño menor a malla 100 (Figura 4.3).
6. Se repite el proceso hasta utilizar toda la sal gruesa disponible.



Figura 4.3: Sal pulverizada

4.3.2. Preparación de solución

El agente lixiviante a utilizar será un medio acuoso con base en ácido clorhídrico, esta solución deberá tener un pH de 1,5 y 40 [$^{g}/_{l}$ de Cl^{-}], los cuales son los parámetros establecidos frecuentemente en la industria para este tipo de soluciones y por lo tanto es lo solicitado por FOSTER. Para esto, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se agrega 500 [ml] de agua destilada a un vaso precipitado.
2. Se agregan los 40 [$^{g}/_{l}$ de Cl^{-}].
3. Se mide el pH de la solución mediante un pH-metro.
4. Se agrega ácido sulfúrico hasta que el pH sea igual a 1,5, registrando el volumen de ácido utilizado (aproximadamente 450[μl] de ácido sulfúrico), como se ve en la Figira 4.4.



Figura 4.4: Preparación de solución lixiviante

4.4. Pretratamiento de mineral

El pretratamiento del mineral consiste en su preparación para la lixiviación, mediante el proceso denominado aglomeración y curado. En este proceso, el mineral es regado con una solución para provocar la adhesión de las partículas finas a las gruesas, asegurando una permeabilidad adecuada que permita obtener resultados favorables en la lixiviación. En el caso de esta memoria, el pretratamiento incluye la adición de un porcentaje de ácido sulfúrico y de NaCl, cuyas cantidades se detallan en las siguientes secciones, junto con un volumen de solución suficiente para alcanzar el 80 % de la humedad de impregnación.

4.4.1. Incorporación NaCl

Se agrega la cantidad de NaCl correspondiente al test EMELA® que se encuentra indicado en la Tabla 4.1, la mezcla entre el mineral y NaCl debe ser mezclada mediante roleo durante 1 minuto, con el objetivo de alcanzar una correcta homogeneización entre el NaCl y el mineral, como se ve en la Figura 4.5.



Figura 4.5: Mezcla de muestra mineral con sal

4.4.2. Incorporación solución lixiviante

Se agrega la solución lixiviante, de tal manera que la humedad del mineral no exceda el 80 % de la humedad de impregnación del mineral (Ecuación 4.4).

$$Masa_{solución} = (Masa_{Mineral} * \frac{H_I}{100} * 0.8) - Masa_{MineralHumedadNatural} \tag{4.6}$$

Una vez conocida la masa, se debe medir la densidad de la solución. Para esto, se mide la masa de un picnómetro vacío (m_1), se mide la masa del picnómetro relleno de la solución (m_3) y se mide la masa del picnómetro relleno de agua destilada (m_2), calculando la densidad mediante la Ecuación 4.2.

Con la masa de solución y la densidad de la misma, es posible calcular el volumen de solución lixiviante a utilizar.

$$Volumen_{Solución} = \frac{Masa_{Solución}}{\rho_{Solución}} \tag{4.7}$$

La temperatura de la solución debe coincidir con lo mencionado en la Tabla 4.1, para esto se elevará la temperatura de la solución mediante Baño María, además de una placa calefactora, como se ve en la Figura 4.6. También se debe considerar que para mantener la temperatura durante el tiempo de reposo, las muestras serán almacenadas en una estufa que mantendrá la temperatura establecida.



Figura 4.6: Elevación de temperatura de solución lixiviante

La mezcla debe ser roleada nuevamente por 1 minuto con tal de homogeneizarla, permitiendo que la solución llegue a la mayor cantidad de mineral posible.

4.4.3. Incorporación ácido sulfúrico

Se incorpora el volumen de ácido sulfúrico según el porcentaje indicado en la Tabla 4.1, para esto se debe considerar la Ecuación 4.8 y se agrega utilizando una micropipeta como se ve en la Figura 4.7. Roleando el mineral por 1 minuto.

$$Volumen_{\text{Ácido}} = \frac{Masa_{Mineral} * \%\text{Ácido} * CEA}{\rho_{\text{Ácido}} * Pureza_{\text{Ácido}}} \tag{4.8}$$



Figura 4.7: Incorporación de ácido sulfúrico a la mezcla mediante micropipeta

4.4.4. Reposo de mineral

El valor V4 de la Tabla 4.1 se refiere a los días de reposo del mineral, siendo 15 días inicialmente, y después se realizan ensayos de 4 y 25 días para analizar la implicación de este parámetro en la recuperación. A lo largo del tiempo de reposo, el mineral debe mantener una masa constante, por lo que se masa la mezcla (Figura 4.8), y de forma diaria, se debe humectar el mineral con solución lixiviante, procurando mantener la misma masa a lo largo de los días.

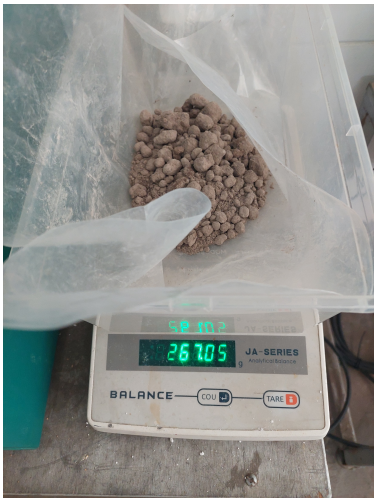


Figura 4.8: Masa mineral humectado

4.5. Lixiviación de mineral

Una vez finalizado el tiempo de reposo, se agrega el mineral húmedo en un vaso precipitado, al cual, además, se le añade un volumen de solución tal, que se genere una proporción mineral:solución de 30:70 en volumen. Este mineral depositado en solución lixiviante inicia el proceso de lixiviación con la ayuda de un agitador mecánico (Figura 4.9), realizando un proceso de lixiviación agitada, el cual, contempla una duración de 5 horas, donde, por petición de la empresa FOSTER, se mide pH y potencial REDOX. La primera medición se realiza a los 5 minutos de iniciada la lixiviación agitada, seguido de los siguientes 10 minutos, los siguientes 15 minutos y los siguientes 30 minutos, midiendo cada 30 minutos hasta finalizar la lixiviación, teniendo un total de 12 mediciones a lo largo de las 5 horas que demora el proceso.



Figura 4.9: Lixiviación agitada

Una vez finalizada la lixiviación, se realiza una separación de sólidos y solución, utilizando un embudo con papel filtro, se busca depositar la solución resultante, es decir, el PLS, en un matraz, mientras que el residuo sólido, es decir el ripio, queda precipitado sobre el papel filtro, como se puede ver en la Figura 4.10.



Figura 4.10: Proceso de filtrado

.

El ripio obtenido se debe masar (Figura 4.11) para posteriormente secarlo en un horno a 100°C. Una vez el ripio esté seco, debe ser pulverizado hasta tener un tamaño bajo malla 100 (Figura 4.12). Una vez todo el mineral se encuentre bajo esta malla, se realiza un proceso de

roleo y cuarteo, hasta obtener 30 [g] de ripio, el cual será almacenado y enviado a un análisis de contenido de cobre.

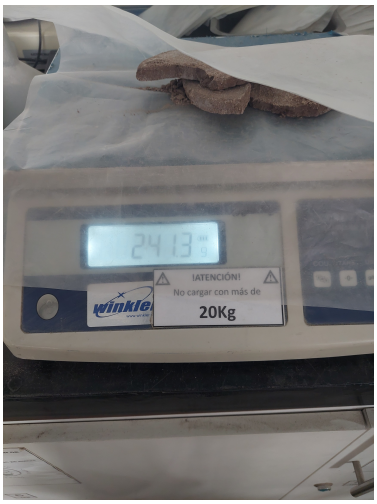


Figura 4.11: Medición de masa de ripio obtenido



Figura 4.12: Reducción de tamaño de muestra

El PLS depositado en el Matraz se pasa a una Probeta, en la cual se mide el volumen de PLS obtenido, Figura 4.13, para posteriormente ser depositado en un frasco, el cual será enviado a un análisis de contenido de cobre junto a las muestras de ripio como se ve en la Figura 4.14.

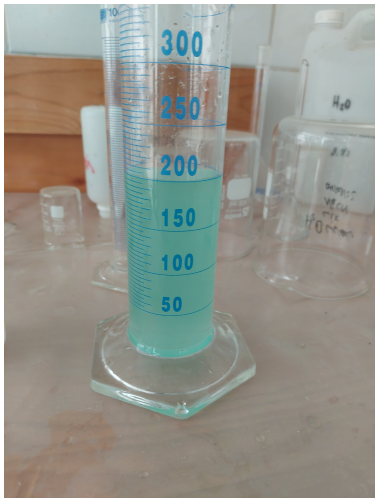


Figura 4.13: Medición de volumen de PLS obtenido



Figura 4.14: Conjunto de muestras solidas y líquidas para análisis de cobre en laboratorio

Capítulo 5

Resultados y Discusiones

5.1. Ley de mineral

Minera Pampa Camarones entregó dos muestras de mineral para el desarrollo de la presente memoria de título, indicando que correspondían a un óxido de cobre y un sulfuro de cobre, M1 y M2, sin indicar cual corresponde a cada uno. Para la caracterización del mineral, se realizó un análisis de contenido de cobre y hierro, donde la Tabla 5.1 muestra los resultados de estos.

Tabla 5.1: Leyes de muestras de mineral de cabeza

Muestra	Ley de Cu (%)	Ley de Fe (%)
M1	1,43	6,42
M2	1,43	6,41

El hecho de que no se haya realizado un estudio detallado de la composición mineralógica en esta memoria, debido a la limitada cantidad de muestra entregada, restringió a solamente realizar un análisis a las leyes de cobre y hierro. Esta falta de caracterización completa impide asegurar la precisión de las muestras y limita la comprensión de cómo los diferentes parámetros del proceso de lixiviación afectan a cada una de las especies minerales presentes.

5.2. Dosificación de ácido (V1)

La primera variable a ser modificada es la dosificación de ácido, realizando 4 ensayos, variando el porcentaje de ácido en 30 %, 50 %, 70 % y 100 %. La Tabla 5.2 muestra los valores establecidos para el pretratamiento de M1, así como la Tabla 5.3 muestra los parámetros para la muestra M2.

Al contemplar una temperatura ambiente, pero no haber realizado una medición en el momento, se consideran los datos de temperatura en el mes de octubre del año 2023, con temperaturas que varían entre los 4°C y los 28°C, con una temperatura promedio de 15°C (AccuWeather, 2023).

Tabla 5.2: Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de ácido (V1) para muestras de mineral M1

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
Dosificación de ácido (V1)	209,14	0,3	15	1082,30	31,37	15	15	18,23
	204,65	0,5	15	2471,15	30,70	15	15	18,32
	204,02	0,7	15	2463,54	30,19	15	15	15,05
	201,56	1	15	3476,91	30,23	15	15	13,30

Tabla 5.3: Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de ácido (V1) para muestras de mineral M2

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
Dosificación de ácido (V1)	188,06	0,3	15	973,21	28,21	15	15	27,09
	200,64	0,5	15	2996,22	30,10	15	15	30,07
	194,39	0,7	15	2348,59	29,18	15	15	25,66
	194,50	1	15	3355,13	29,18	15	15	23,89

Al cumplir los 15 días de reposo, se inicia la lixiviación agitada de la muestra M1, la cual tiene una duración de 5 horas, donde se mide pH (Figura 5.1) y potencial REDOX (Figura 5.2) como se ve en la Tabla D.1.

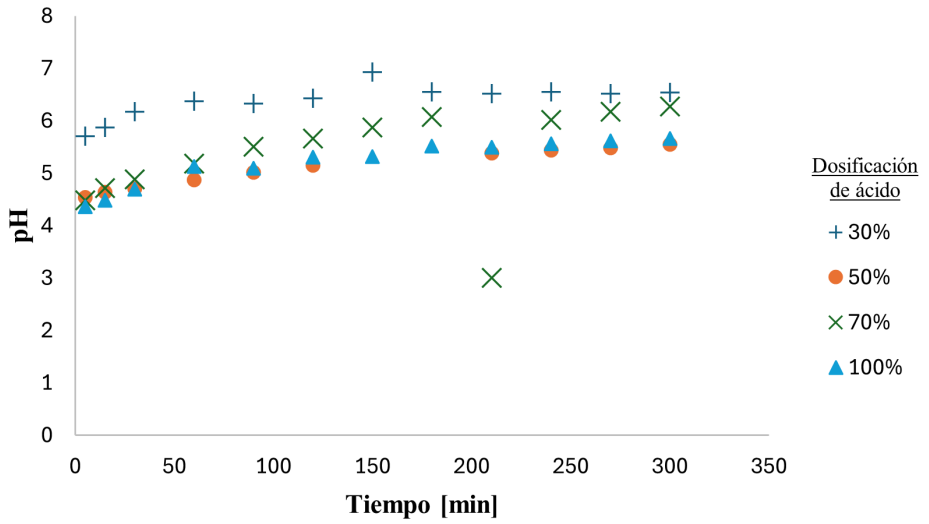


Figura 5.1: Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de ácido

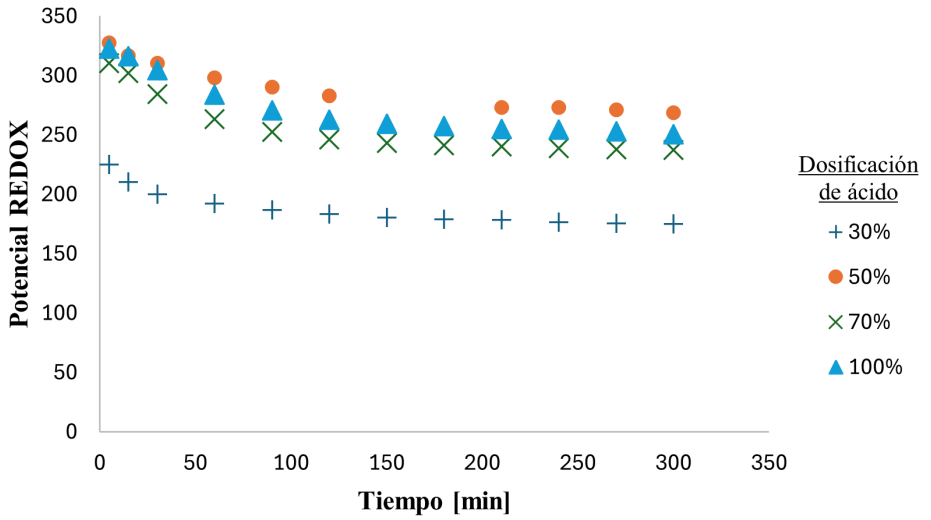


Figura 5.2: Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de ácido

Se repite el procedimiento con la muestra M2, midiendo el pH (Figura 5.3) y potencial REDOX (Figura 5.4) como se ve en la Tabla D.2.

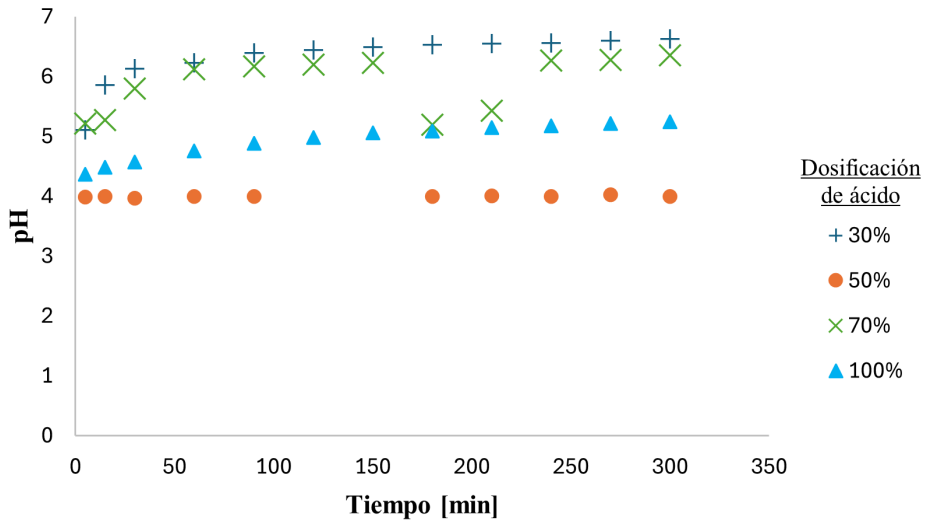


Figura 5.3: Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de ácido

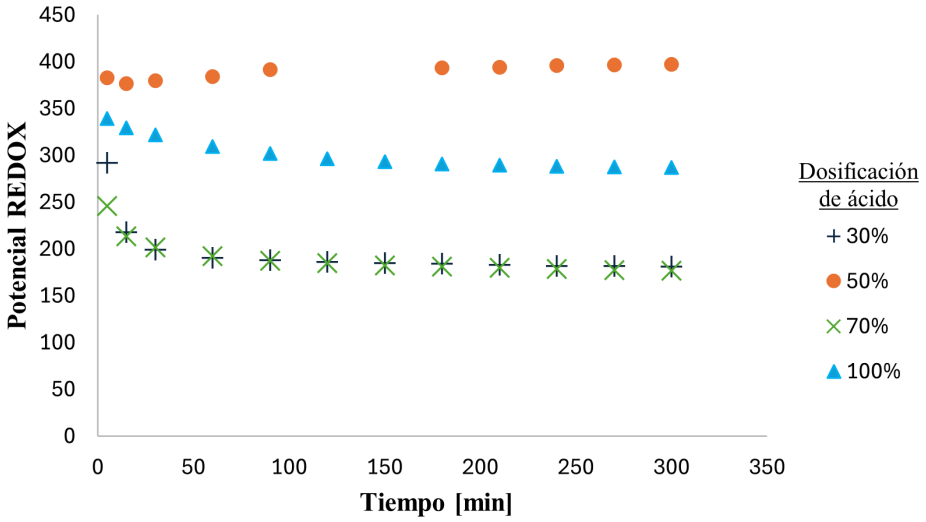


Figura 5.4: Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de ácido

Una vez finalizada la lixiviación, se mide el volumen de PLS y la masa de ripio obtenida, tanto para M1 Tabla 5.4 como para M2 Tabla 5.5.

Tabla 5.4: Medición de PLS y ripio de M1

Dosificación de ácido	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
30 %	180 ±1	200,80 ±0, 01
50 %	195 ±1	212,30 ±0, 01
70 %	170 ±1	220,42 ±0, 01
100 %	155 ±1	201,60 ±0, 01

Tabla 5.5: Medición de PLS y ripio de M2

Dosificación de ácido	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
30 %	200 ±1	189,50 ±0, 01
50 %	200 ±1	1885,60 ±0, 01
70 %	145 ±1	202,60 ±0, 01
100 %	160 ±1	203,30 ±0, 01

Con el análisis de laboratorio, el cual entrega el porcentaje de cobre, se puede calcular la recuperación de cobre producto de la lixiviación, como muestra la Tabla 5.6 y Tabla 5.7

Tabla 5.6: Recuperación de cobre en M1 al modificar dosificación de ácido (V1)

Dosificación de ácido	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [g/L]	%R Cu
30 %	1,47	0,09	0,55
50 %	1,33	0,039	0,27
70 %	**1,42**	**0,12**	**0,65**
100 %	1,34	0,044	0,25

Tabla 5.7: Recuperación de cobre en M2 al modificar dosificación de ácido (V1)

Dosificación de ácido	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [g/L]	%R Cu
30 %	1,40	0,03	0,25
50 %	1,22	0,01	0,12
70 %	**1,30**	**0,07**	**0,36**
100 %	1,4	0,07	0,36

De la Tabla 5.6 y Tabla 5.7, se puede concluir que la dosificación de ácido de 70 % es aquella que obtiene recuperaciones más altas, por lo que es el valor que se considerará en los ensayos posteriores. En el caso específico de M2, al tener igual resultado entre la dosificación de ácido de 70 % y de 100 %, se considera la dosificación de 70 % debido a un factor económico que será desarrollado más adelante (Sección 5.6).

Es importante considerar que la lixiviación del mineral se llevó a cabo en agitación durante 5 horas a temperatura ambiente, lo cual pudo haber afectado negativamente los resultados debido al tiempo limitado y a la falta de un control preciso de la temperatura. Esta metodología será repetida en los ensayos posteriores, pero es necesario tener en cuenta que factores como la temperatura ambiente podrían influir en los resultados. Estos factores no fueron considerados al momento de desarrollar los ensayos, y pueden modificar de cierta forma los resultados finales.

5.3. Dosificación de NaCl (V2)

Una vez establecida una dosificación de ácido de un 70 % se estudia la modificación de la dosificación de NaCl, realizando 2 ensayos variando el porcentaje de NaCl en 5 % y 25 %, los cuales son los valores estándar que se consideran en este tipo de procedimientos, y se ve limitado por temas de espacio requerido en un reactor y será discutido más adelante. Se debe considerar que ya existe un resultado que contempla un 70 % de dosificación de ácido y un 15 % de dosificación de NaCl. La Tabla 5.8 muestra los valores establecidos para el pretratamiento de M1, así como la Tabla 5.9 muestra los parámetros para la muestra M2.

Al contemplar una temperatura ambiente, pero no haber realizado una medición en el momento, se considera los datos de temperatura en el mes de enero del año 2024, con temperaturas que varían entre los 10°C y los 34°C, con una temperatura promedio de 22°C (AccuWeather, 2024).

Tabla 5.8: Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de NaCl (V2) para muestras de mineral M1

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
Dosificación	201,26	70	5	2430,21	10,08	22	15	15,11
de NaCl (V2)	201,50	70	25	2433,11	51,01	22	15	15,37

Tabla 5.9: Parámetros utilizados en ensayos de dosificación de NaCl (V2) para muestras de mineral M2

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
Dosificación	194,11	70	5	2347,26	9,72	22	15	25,65
de NaCl (V2)	196,14	70	25	2343,88	48,53	22	15	25,61

Al cumplir los 15 días de reposo, se inicia la lixiviación agitada de la muestra M1, la cual tiene una duración de 5 horas, donde se mide pH (Figura 5.5) y potencial REDOX (Figura 5.6) como se ve en la Tabla D.3.

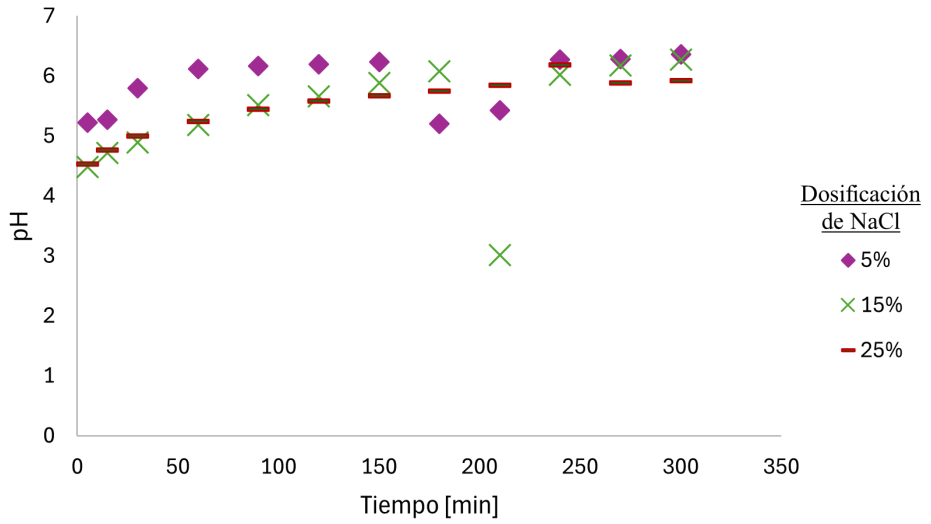


Figura 5.5: Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de NaCl

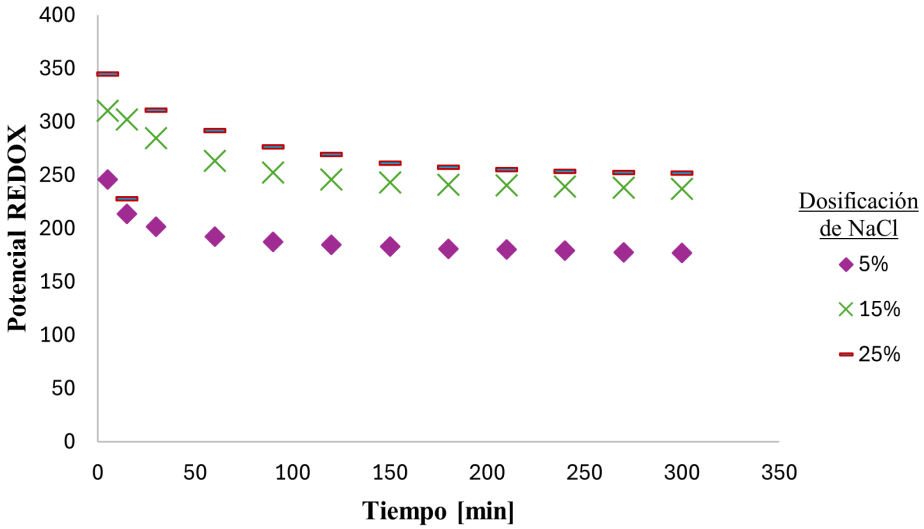


Figura 5.6: Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M1 al modificar la dosificación de NaCl

Se repite el procedimiento con la muestra M2, midiendo el pH (Figura 5.7) y potencial REDOX (Figura 5.8) como se ve en la y Tabla D.4.

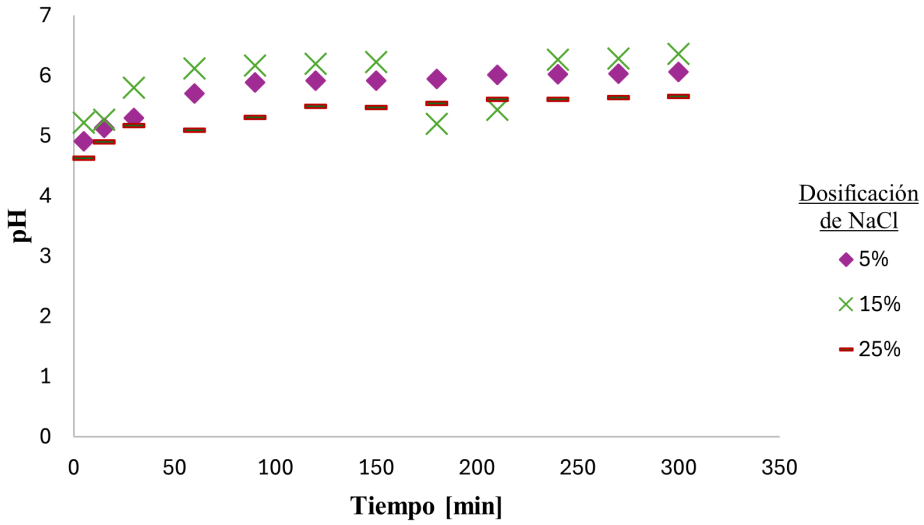


Figura 5.7: Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de NaCl

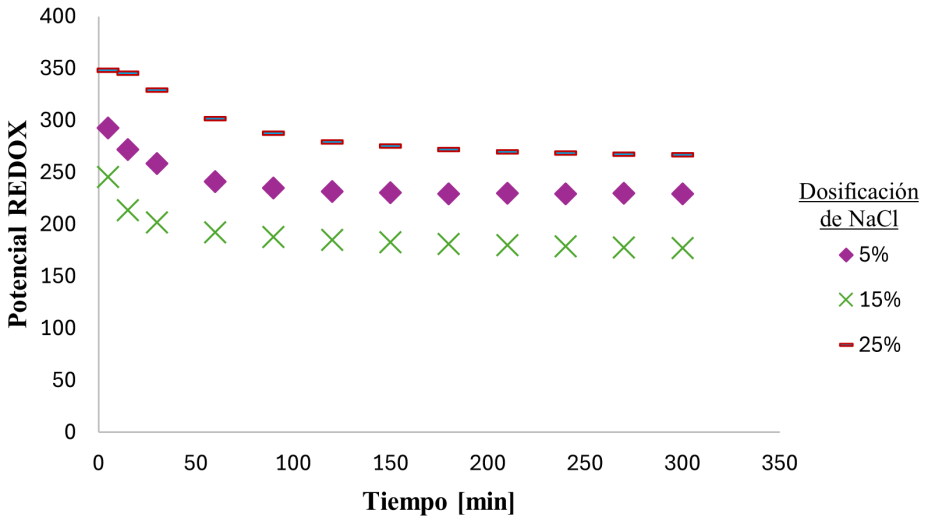


Figura 5.8: Medición de potencial REDOX durante la lixiviación de M2 al modificar la dosificación de NaCl

Una vez finalizada la lixiviación, se mide el volumen de PLS y la masa de ripio obtenida, tanto para M1 Tabla 5.10 como para M2 Tabla 5.11.

Tabla 5.10: Medición de PLS y ripio de M1 al modificar dosificación de NaCl (V2)

Dosificación de NaCl	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
5 %	145 ±1	202,60 ±0, 01
25 %	200 ±1	226,90 ±0, 01

Tabla 5.11: Medición de PLS y ripio de M2 al modificar dosificación de NaCl (V2)

Dosificación de NaCl	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
5 %	140 ±1	222,30 ±0, 01
25 %	170 ±1	261,80 ±0, 01

Con el análisis de laboratorio, el cual entrega el porcentaje de cobre, se puede calcular la recuperación de cobre producto de la lixiviación, como muestra la Tabla 5.12 y Tabla 5.13, en ambas se considera el resultado obtenido en el ensayo de 70 % ácido y 15 % NaCl.

Tabla 5.12: Recuperación de cobre en M1 al modificar dosificación de NaCl (V2)

Dosificación de NaCl	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [gr/L]	%R Cu
5 %	1,50	0,02	0,10
15 %	1,42	0,12	0,65
25 %	**1,30**	**0,26**	**1,73**

Tabla 5.13: Recuperación de cobre en M2 al modificar dosificación de NaCl (V2)

Dosificación de NaCl	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [gr/L]	%R Cu
5 %	1,26	0,04	0,20
15 %	1,30	0,07	0,36
25 %	**1,27**	**0,15**	**0,76**

De la Tabla 5.12 y Tabla 5.13, se puede concluir que la dosificación de NaCl de 25 % es aquella que obtiene recuperaciones más altas, por lo que es el valor que se considerará en los ensayos posteriores.

De este resultado se puede concluir que, a mayor cantidad de NaCl utilizada, mayor será la recuperación de cobre. Sin embargo, es importante considerar las limitaciones involucradas, como el espacio disponible en el reactor y el costo del NaCl, que podrían afectar la viabilidad económica y operativa del proceso.

5.4. Temperatura de solución (V3)

Una vez establecida una dosificación de ácido del 70 % y una dosificación de NaCl del 25 %, se procede a estudiar el efecto de la modificación de la temperatura de la solución lixiviante. Para ello, se realizan dos ensayos con variaciones de temperatura a 20°C y 40°C. Las muestras se mantendrán en una estufa (Anexo F.12), lo que permitirá alcanzar la temperatura deseada y añadir la solución sin grandes diferencias térmicas. Cabe destacar que ya se cuenta con resultados obtenidos a temperatura ambiente (15°C en los ensayos de V1 y 22°C en los ensayos de V2), con una dosificación de ácido del 70 % y una dosificación de NaCl del 15 %. La Tabla 5.14 muestra los valores establecidos para el pretratamiento de la muestra M1, mientras que la Tabla 5.15 presenta los parámetros correspondientes a la muestra M2.

Tabla 5.14: Parámetros utilizados en ensayos de temperatura de solución lixiviante (V3) para muestras de mineral M1

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
Temperatura de	213,06	70	25	2572,70	50,38	20	15	14,88
solución (V3)	209,74	70	25	2532,61	53,27	40	15	16,06

Tabla 5.15: Parámetros Utilizados en ensayos de temperatura de solución lixiviante (V3) para muestras de mineral M2

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
Temperatura de	191,76	70	25	2368,39	49,04	20	15	25,88
solución (V3)	196,43	70	25	2315,50	47,94	40	15	25,30

Al cumplir los 15 días de reposo, se inicia la lixiviación agitada de la muestra M1, la cual tiene una duración de 5 horas, donde se mide pH (Figura 5.9) como se ve en la Tabla D.5.

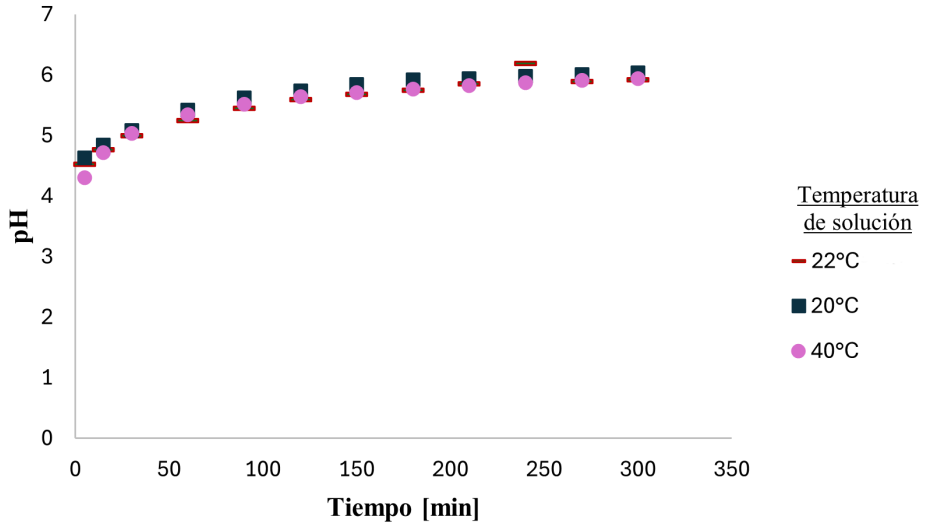


Figura 5.9: Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar la temperatura de solución lixiviante

Se repite el procedimiento con la muestra M2, midiendo el pH (Figura 5.10) como se ve en la Tabla D.6.

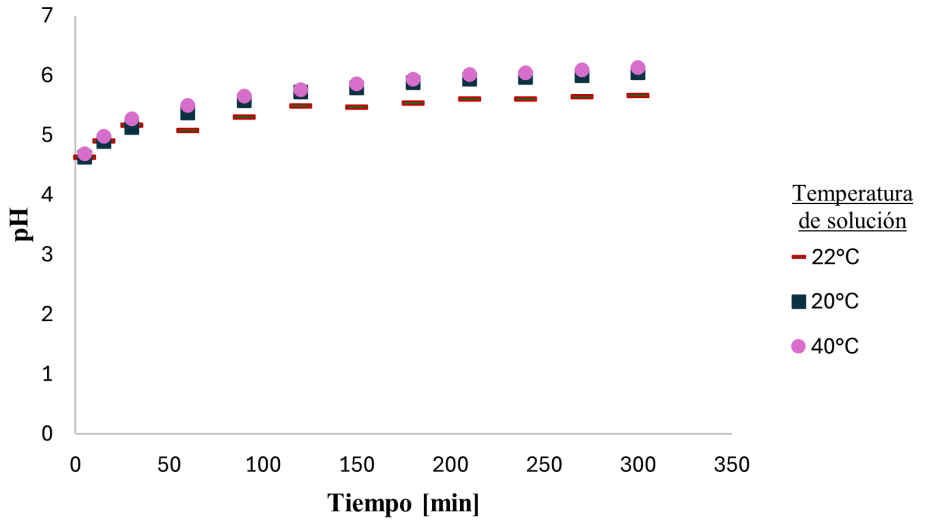


Figura 5.10: Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar la temperatura de solución lixiviante

Una vez finalizada la lixiviación, se mide el volumen de PLS y la masa de ripio obtenida, tanto para M1 Tabla 5.16 como para M2 Tabla 5.17.

Tabla 5.16: Medición de PLS y ripio de M1 al modificar temperatura solución (V3)

Temperatura solución	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
20°C	230 ±1	284,20 ±0,01
40°C	225 ±1	256,50 ±0,01

Tabla 5.17: Medición de PLS y ripio de M2 al modificar temperatura solución (V3)

Temperatura solución	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
20°C	180 ±1	270,10 ±0,01
40°C	180 ±1	274,00 ±0,01

Con el análisis de laboratorio, el cual entrega el porcentaje de cobre, se puede calcular la recuperación de cobre producto de la lixiviación, como muestra la Tabla 5.18 y Tabla 5.19, en ambas se considera el resultado obtenido en el ensayo de 70 % ácido y 15 % NaCl.

Tabla 5.18: Recuperación de cobre en M1 al modificar temperatura solución (V3)

Temperatura solución	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [gr/L]	%R Cu
20°C	1,34	0,05	0,30
22°C	1,30	0,26	1,73
40°C	**1,34**	**0,07**	**0,45**

Tabla 5.19: Recuperación de cobre en M2 al modificar temperatura solución (V3)

Temperatura solución	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [gr/L]	%R Cu
20°C	1,22	0,03	0,16
22°C	1,27	0,15	0,76
40°C	**1,21**	**0,07**	**0,38**

De la Tabla 5.18 y Tabla 5.19, se puede concluir la temperatura ambiente es la temperatura ideal para la lixiviación, ya que se obtiene una mayor recuperación. Sin embargo, es importante señalar que "temperatura ambiente" abarca un amplio rango, esto debido, a que los 4 ensayos se realizaron en diferentes épocas del año, abarcando temperaturas fluctuando desde cerca de 0°C hasta por encima de 40°C. Mientras, el primer ensayo se realizó en octubre del año 2023, con temperaturas que varían entre los 4°C y los 28°C, con una temperatura promedio de 15°C (AccuWeather, 2023), mientras que el segundo ensayo se realizó en enero del año 2024, con temperaturas que varían entre los 10°C y los 34°C, con una temperatura promedio de 22°C (AccuWeather, 2024).

Las diferencias en los resultados podrían deberse a los cambios en la metodología aplicada

al variar la temperatura. En los primeros ensayos, no se mantenía un ambiente controlado, con temperaturas variables y un flujo de aire constante. En cambio, los ensayos posteriores se realizaron en un ambiente controlado, con temperatura constante, ya que las muestras se almacenaron en una estufa, donde no hubo flujo de aire ni variaciones de temperatura.

Como se mencionó anteriormente en esta memoria, el Test EMELA® es una técnica que tiene como objetivo determinar la máxima extracción de cobre a partir de minerales refractarios, seleccionando los mejores resultados para optimizar la operación. Sin embargo, en este punto comienzan a evidenciarse ciertas limitaciones, como la gran cantidad de ensayos necesarios para lograr una optimización adecuada. Aunque se identifican valores máximos para cada parámetro, el método no permite evaluar si un incremento de dichos parámetros podría conducir a una mayor recuperación de cobre. Además, no se facilita la combinación de parámetros para analizar posibles interacciones, y la dependencia de resultados previos prolonga considerablemente la duración de los ensayos.

Debido a la demora en la obtención de resultados y las limitaciones de tiempo en el desarrollo de esta memoria, se decidió continuar los ensayos basándose en la bibliografía en lugar de esperar los resultados finales. Por lo tanto, los ensayos se realizaron con una temperatura de solución de 40°C, ya que, en teoría, una mayor temperatura debería mejorar la cinética de la lixiviación. Sin embargo, en esta memoria, este comportamiento no se observó, probablemente debido a las limitaciones en el control ambiental mencionadas anteriormente.

5.5. Tiempo de reposo (V4)

Finalmente establecida una dosificación de ácido de un 70 % y la dosificación de NaCl de un 25 % y una temperatura de solución lixiviante de 40°C, se estudia la modificación del tiempo de reposo, realizando 2 ensayos variando el tiempo en 4 días y 25 días, siendo 4 días el tiempo ideal esperado por parte de Pampa Camarones, y 25 días una cantidad de días estándar en este tipo de estudios. Se tiene la intensión de comprobar que un mayor tiempo de pretratamiento consigue una mayor recuperación de cobre. Considerando que ya existe un resultado con tiempo de reposo de 15 días, una temperatura de 40°C, además de una dosificación de ácido de 70 % y un 15 % de dosificación de NaCl. La Tabla 5.20 muestra los valores establecidos para el pretratamiento de M1, así como la Tabla 5.21 muestra los parámetros para la muestra M2.

Tabla 5.20: Parámetros utilizados en ensayos de tiempo de reposo (V4) para muestras de mineral M1

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
tiempo de	187,3	70	25	2261,65	46,83	40	4	14,06
reposo (V4)	205,39	70	25	2480,08	51,02	40	25	15,29

Tabla 5.21: Parámetros utilizados en ensayos de tiempo de reposo (V4) para muestras de mineral M2

Variable	Masa mineral [g]	% Ácido	% Sal	V1 [μL]	V2 [g]	V3 [°C]	V4 [días]	Volumen de solución [ml]
tiempo de	178,54	70	25	2155,87	44,64	40	4	23,55
reposo (V4)	198,55	70	25	2319,97	48,03	40	25	25,35

Al cumplir los 4 días de reposo y 25 días respectivamente, se inicia la lixiviación agitada de la muestra M1, la cual tiene una duración de 5 horas, donde se mide pH (Figura 5.11) como se ve en la Tabla D.7.

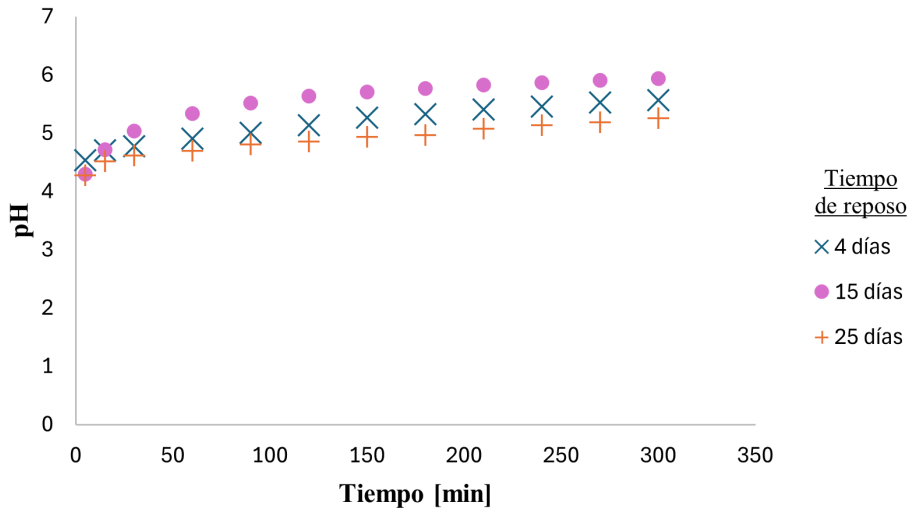


Figura 5.11: Medición de pH durante la lixiviación de M1 al modificar el tiempo de reposo

Se repite el procedimiento con la muestra M2, midiendo el pH (Figura 5.12) como se ve en la y Tabla D.8.

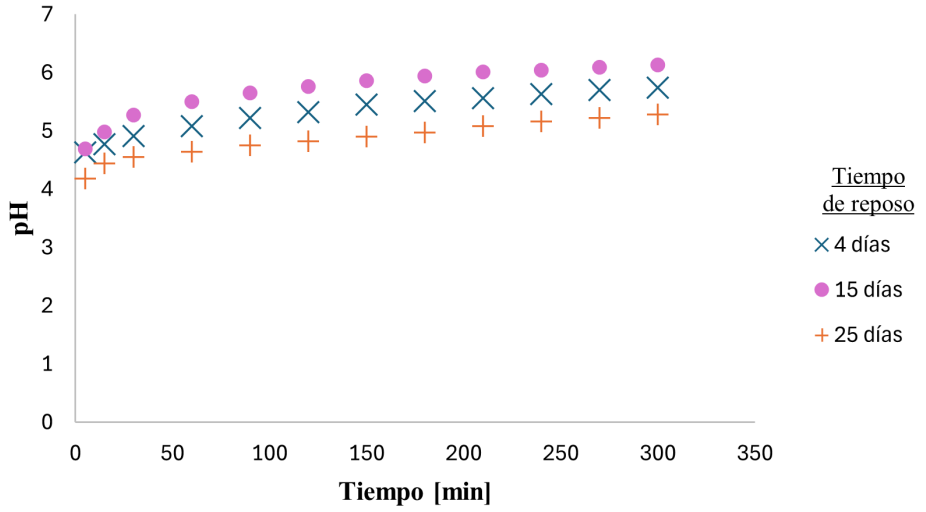


Figura 5.12: Medición de pH durante la lixiviación de M2 al modificar el tiempo de reposo

Una vez finalizada la lixiviación, se mide el volumen de PLS y la masa de ripio obtenida, tanto para M1 Tabla 5.22 como para M2 Tabla 5.23.

Tabla 5.22: Medición de PLS y ripio de M1 al modificar tiempo de reposo (V4)

Tiempo de reposo	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
4 [días]	202 ±1	247,20 ±0, 01
25 [días]	164 ±1	236,3 ±0, 01

Tabla 5.23: Medición de PLS y ripio de M2 al modificar tiempo de reposo (V4)

Tiempo de reposo	Volumen de PLS [ml]	Masa ripio [g]
4 [días]	178 ±1	243,4 ±0, 01
25 [días]	188 ±1	273,4 ±0, 01

Con el análisis de laboratorio, el cual entrega el porcentaje de cobre, se puede calcular la recuperación de cobre producto de la lixiviación, como muestra la Tabla 5.24 y Tabla 5.25, en ambas se considera el resultado obtenido en el ensayo de 70 % ácido y 15 % NaCl.

Tabla 5.24: Recuperación de cobre en M1 al modificar tiempo de reposo (V4)

Tiempo de Reposo	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [gr/L]	%R Cu
4 [días]	1,26	0,20	1,28
15 [días]	1,34	0,07	0,45
25 [días]	**1,18**	**0,15**	**1,02**

Tabla 5.25: Recuperación de cobre en M2 al modificar tiempo de reposo (V4)

Tiempo de reposo	%Cu ripio	Concentración de Cu en PLS [gr/L]	%R Cu
4 [días]	1,29	0,12	0,68
15 [días]	1,21	0,07	0,38
25 [días]	**1,06**	**0,18**	**1,15**

El valor de recuperación a los 4 días, mostrado en la Tabla 5.24, no puede ser explicado con certeza y podría deberse a un error, el cual no puede ser verificado debido a la falta de un ensayo en duplicado. Esto no fue posible realizarlo debido a la escasez de muestras de mineral. A pesar de esta incertidumbre, se puede esperar que, a mayor cantidad de días, la recuperación sea mayor. Sin embargo, la industria minera exige una reducción en el tiempo de espera tanto en el proceso de aglomerado y curado como en la lixiviación, lo que hace crucial encontrar maneras de obtener mayores recuperaciones en menor tiempo de reposo.

5.6. Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica correspondiente, se emplearán precios referenciales de los componentes del pretratamiento, es decir, ácido sulfúrico y NaCl. La Tabla 5.26 muestra los precios que se utilizarán en el análisis.

Tabla 5.26: Precios de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y energía eléctrica septiembre de 2024

Especie	Precio	Unidad	Página web	Referencia
Ácido Sulfúrico 98 %	40.900	CLP$/25kg	productosquimicos.cl	(Ácido sulfúrico, 2024)
Cloruro de sodio industrial (sal)	11.500	CLP$/25kg	quimicaindustrial.cl	(Cloruro de Sodio Industrial, 2024)
Energía eléctrica	146,602	CLP$/kWh	enel.cl	(ENEL, 2023)

Considerando los valores de ácido sulfúrico requerido para cada ensayo (Tabla 4.1) y la densidad del ácido sulfúrico (Tabla 4.9) , se puede saber la masa de ácido sulfúrico utilizado, el cual, considerando la información de precios de ácido sulfúrico de la Tabla 5.26, se puede estimar el costo asociado para cada uno de los ensayos, como se indica en la Tabla 5.27 y Tabla 5.28.

Tabla 5.27: Costos asociados a ácido utilizado en la mezcla inicial M1

Nº Experimento	Volumen de ácido en mezcla [ml]	Masa de ácido en mezcla [kg]	Costo de ácido en mezcla [CLP]
1	1,08	0,02	32,58
2	2,47	0,05	74,39
3	2,46	0,05	74,16
4	3,48	0,06	104,66
5	2,43	0,04	73,16
6	2,43	0,04	73,24
7	2,57	0,05	77,44
8	2,53	0,05	76,24
9	2,26	0,04	68,08
10	2,48	0,05	74,66

Tabla 5.28: Costos asociados a ácido utilizado en la mezcla inicial M2

Nº Experimento	Volumen de ácido en mezcla [ml]	Masa de ácido en mezcla [kg]	Costo de ácido en mezcla [CLP]
1	0,97	0,02	29,30
2	3,00	0,06	90,19
3	2,35	0,04	70,66
4	3,36	0,06	101,00
5	2,35	0,04	70,70
6	2,34	0,04	70,56
7	2,37	0,04	71,29
8	2,32	0,04	69,70
9	2,16	0,04	64,90
10	2,32	0,04	69,84

Considerando los valores de dosificación de NaCl requerido para cada ensayo (Tabla 4.1) y la información de precios de cloruro de sodio de la Tabla 5.26, se puede estimar el costo asociado para cada uno de los ensayos, como se indica en la Tabla 5.29 y Tabla 5.30.

Tabla 5.29: Costos asociados a NaCl utilizado en la mezcla inicial M1

Nº Experimento	Masa de NaCl en mezcla [g]	Costo de NaCl en mezcla [CLP]
1	31,37	14,43
2	30,70	14,12
3	30,19	13,89
4	30,23	13,91
5	10,08	4,64
6	51,01	23,46
7	50,38	23,17
8	53,27	24,50
9	46,83	21,54
10	51,02	23,47

Tabla 5.30: Costos asociados a NaCl utilizado en la mezcla inicial M2

Nº Experimento	Masa de NaCl en mezcla [g]	Costo de NaCl en mezcla [CLP]
1	28,21	12,98
2	30,10	13,84
3	9,72	4,47
4	29,18	13,42
5	29,18	13,42
6	48,53	22,32
7	49,04	22,56
8	47,94	22,05
9	44,64	20,53
10	48,03	22,09

La Tabla 5.31 y Tabla 5.32 muestra la cantidad de solución agregada al mineral en su periodo de pretratamiento, solución la cual se prepara con alrededor de 0,45 [ml] de solución, es decir, corresponde al 0,09 % de esta, y considerando la densidad del ácido sulfúrico (Tabla 4.9) en conjunto con la información de precios de ácido sulfúrico de la Tabla 5.26, se puede estimar el costo de ácido sulfúrico asociado a la solución añadida.

Tabla 5.31: Costos asociados a ácido utilizado en solución M1

Nº Experimento	Volumen total de solución [ml]	Volumen de ácido en solución [ml]	Masa de ácido [kg]	Costo ácido en solución [CLP]
1	49,95	0,04	0,0008	1,35
2	50,72	0,05	0,0008	1,37
3	53,55	0,05	0,0009	1,45
4	44,25	0,04	0,0007	1,20
5	48,28	0,04	0,0008	1,31
6	54,47	0,05	0,0009	1,47
7	30,56	0,03	0,0005	0,83
8	29,28	0,03	0,0005	0,79
9	13,65	0,01	0,0002	0,37
10	109,61	0,10	0,0018	2,97

Tabla 5.32: Costos asociados a ácido utilizado en solución M2

Nº Experimento	Volumen total de solución [ml]	Volumen de ácido en solución [ml]	Masa de ácido [kg]	Costo ácido en solución [CLP]
1	47,11	0,04	0,0008	1,28
2	63,70	0,06	0,0011	1,72
3	83,76	0,08	0,0014	2,27
4	48,01	0,04	0,0008	1,30
5	79,07	0,07	0,0013	2,14
6	85,41	0,08	0,0014	2,31
7	31,60	0,03	0,0005	0,86
8	35,39	0,03	0,0006	0,96
9	17,37	0,02	0,0003	0,47
10	184,46	0,17	0,0031	4,99

La Tabla 5.33 y Tabla 5.34 muestra la cantidad de solución agregada al mineral en su periodo de pretratamiento, solución la cual se prepara con alrededor de 32,67 [g] de NaCl, por lo que se puede estimar la masa de NaCl en solución asumiendo una homogeneización correcta, además de estimar el costo de cloruro de sodio asociado a la solución añadida considerando la información de precios de ácido sulfúrico de la Tabla 5.26.

Tabla 5.33: Costos asociados a NaCl utilizado en solución M1

Nº Experimento	Volumen total solución [ml]	Masa de NaCl en solución [g]	Costo NaCl en solución [CLP]
1	49,95	0,0029	0,0014
2	50,72	0,0030	0,0014
3	53,55	0,0031	0,0014
4	44,25	0,0026	0,0012
5	48,28	0,0028	0,0013
6	54,47	0,0032	0,0015
7	30,56	0,0018	0,0008
8	29,28	0,0017	0,0008
9	13,65	0,0008	0,0004
10	109,61	0,0064	0,0030

Tabla 5.34: Costos asociados a NaCl utilizado en solución M2

Nº Experimento	Volumen total solución [ml]	Masa de NaCl en solución [g]	Costo NaCl en solución [CLP]
1	47,11	0,0028	0,0013
2	63,70	0,0037	0,0017
3	83,76	0,0049	0,0023
4	48,01	0,0028	0,0013
5	79,07	0,0046	0,0021
6	85,41	0,0050	0,0023
7	31,60	0,0019	0,0009
8	35,39	0,0021	0,0010
9	17,37	0,0010	0,0005
10	184,46	0,0108	0,0050

La Tabla 5.35 y Tabla 5.36 muestra las horas que la estufa (F.12) fue utilizada, y por tanto, el consumo energético producido. Considerando el precio energético mencionado en la Tabla 5.26, se consigue el costo de la energía utilizada.

Tabla 5.35: Costos energéticos ensayos M1

N Experimento	Horas útiles utilizada en estufa	Consumo energético [KWH]	Costo energético [$CLP]
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	336	302,4	44332,4448
8	336	302,4	44332,4448
9	72	64,8	9499,8096
10	576	518,4	75998,4768

Tabla 5.36: Costos energéticos ensayos M2

N Experimento	Horas útiles utilizada en estufa	Consumo energético [KWH]	Costo energético [$CLP]
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	336	302,4	44332,4448
8	336	302,4	44332,4448
9	72	64,8	9499,8096
10	576	518,4	75998,4768

La suma de estos costos nos da un costo final, el cual puede ser comparado con la recuperación de cobre en cada ensayo, como se muestra en la Tabla 5.37 y Tabla 5.38.

Tabla 5.37: Costos totales de ensayos y su respectiva recuperación de cobre para M1

Nº Experimento	Costo total ensayos [CLP]	Recuperación de cobre %
1	48,36	0,55
2	89,88	0,27
3	89,50	0,65
4	119,77	0,25
5	79,10	0,10
6	98,18	1,73
7	44433,89	0,30
8	44433,98	0,46
9	9589,80	1,28
10	76099,57	1,02

Tabla 5.38: Costos totales de ensayos y su respectiva recuperación de cobre para M2

Nº Experimento	Costo total ensayos [CLP]	Recuperación de cobre %
1	43,55	0,25
2	105,76	0,12
3	77,40	0,36
4	115,72	0,36
5	86,26	0,20
6	95,19	0,76
7	44427,15	0,16
8	44425,16	0,38
9	9585,71	0,68
10	76095,41	1,15

La Figura 5.13 y Figura 5.14 muestran la relación que existe entre la recuperación de cobre en cada ensayos con el costo asociado a este.

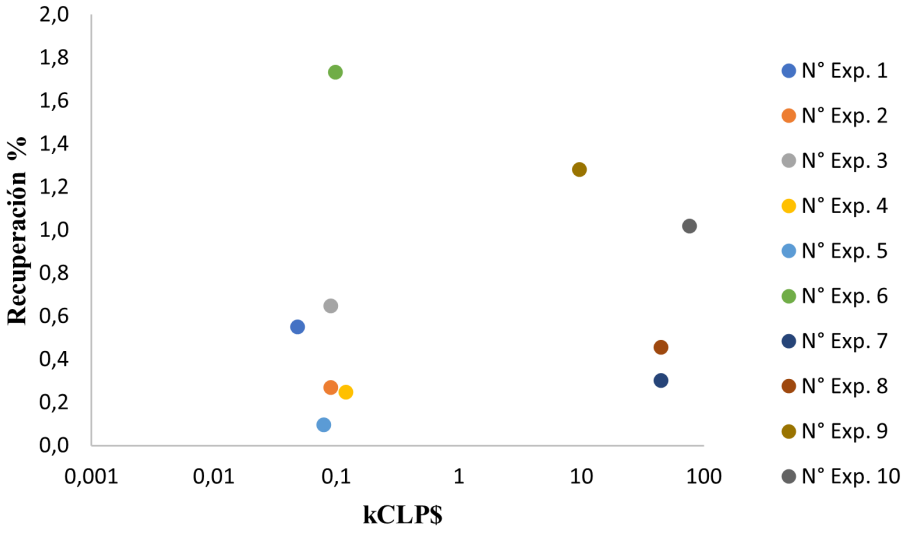


Figura 5.13: Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M1

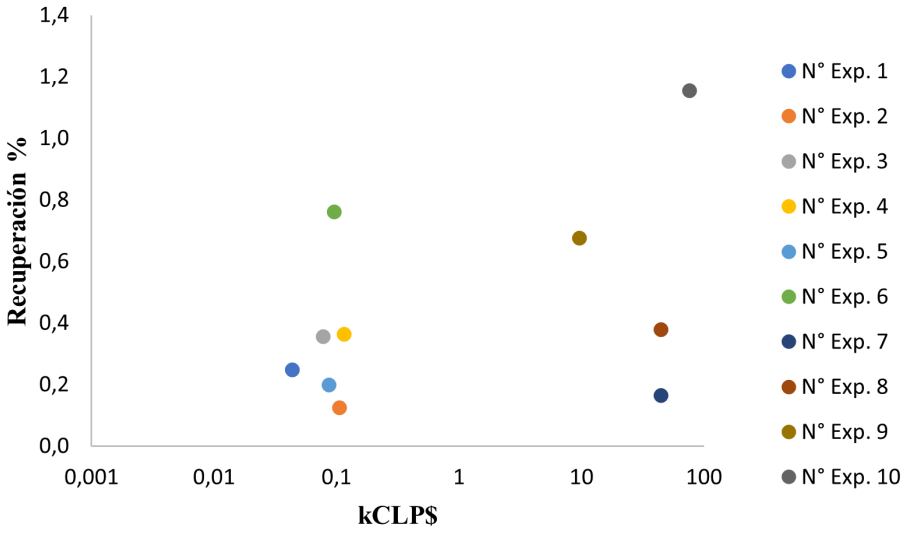


Figura 5.14: Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M2

En ambas muestras, los últimos 4 ensayos incrementan notoriamente su precio debido al consumo eléctrico, lo que no permite analisar correctamente esta relación, por lo que la Figura 5.15 y Figura 5.16 muestran el mismo gráfico, sin considerar dichos ensayos.

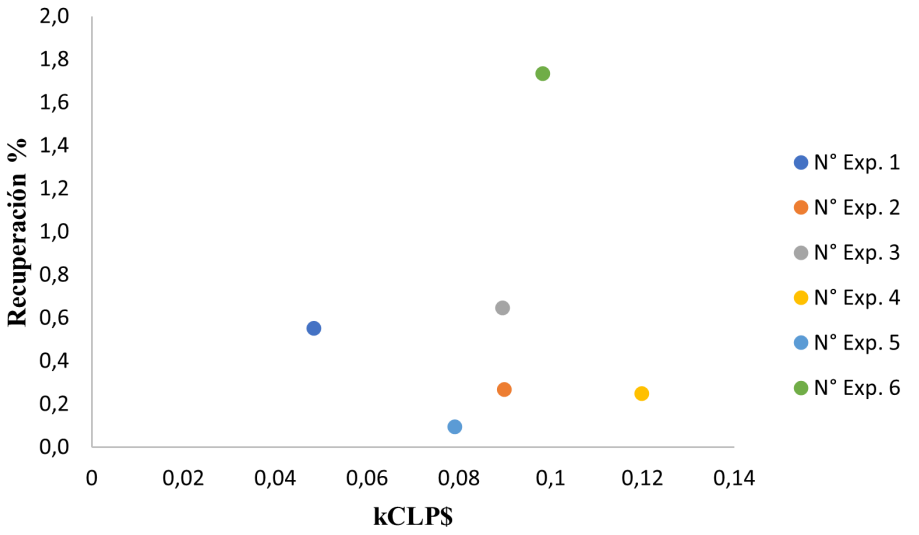


Figura 5.15: Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M1, considerando V1 y V2

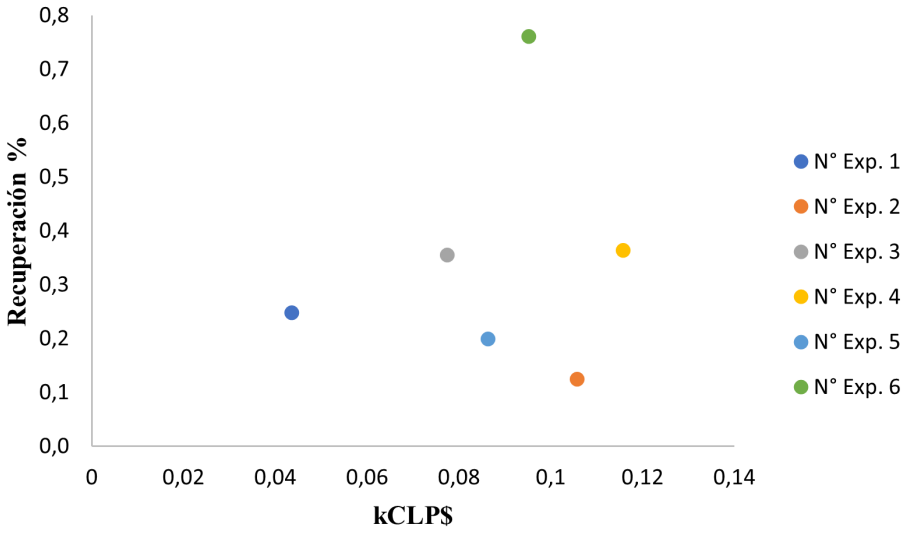


Figura 5.16: Recuperación de cobre % y costos totales de cada ensayo realizado M2, considerando V1 y V2

5.7. Parametros optimizados

Considerando los resultados obtenidos a lo largo de este capítulo, junto con las observaciones derivadas de las discusiones previas y la evaluación económica realizada, es posible determinar los parámetros óptimos para el pretratamiento de los minerales M1 y M2, tal como se muestra en la Tabla 5.39.

Tabla 5.39: Resultados de parámetros optimizados en ensayos M1 y M2

Muestra	Dosificación de ácido [%]	Dosificación de NaCl [%]	Temperatura solución aglomerado [°C]	Tiempo de reposo [Días]
M1	70	25	22	25
M2	70	25	22	25

A pesar de estos resultados, es importante tener en cuenta que otra limitación del estudio es la baja replicabilidad entre la metodología utilizada y el "Reactor Primario" que FOSTER está desarrollando. La metodología de aglomeración y curado del mineral permitió observar las variaciones inducidas por los cambios en los parámetros, pero no demuestra completamente la verdadera utilidad del reactor de FOSTER, debido a que este aún se encuentra en una fase conceptual. Esta falta de validación se debe, en gran medida, a que el equipo está en una etapa muy temprana de desarrollo.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados demuestran que los parámetros estudiados son efectivamente relevantes en el proceso de aglomeración y curado. Sin embargo, no permiten concluir si se debería implementar una modificación en el proceso actual de Pampa Camarones, dado que las recuperaciones de cobre alcanzadas no fueron significativas, siendo la máxima recuperación obtenida de solo un 1,28 %. Este bajo rendimiento podría atribuirse a diversas razones mencionadas a lo largo de las discusiones, como la falta de caracterización del mineral, los factores involucrados en la lixiviación, la efectividad del Test EMELA®, el ambiente controlado en algunos ensayos o el bajo nivel de replicabilidad del "Reactor Primario".

Con base en lo anterior, se recomienda que Pampa Camarones mantenga su proceso actual. Tal como se mencionó en la introducción, Pampa Camarones cuenta con reservas propias de óxidos y sulfuros de cobre, además de recibir mineral de terceros, lo que genera una alta variabilidad en su proceso. Esta variabilidad complica la implementación de nuevas técnicas de pretratamiento orientadas a mejorar la recuperación, que actualmente se sitúa en un 82,7 %. Además, el estudio no pudo demostrar de manera concluyente la relación entre los costos del proceso y la recuperación de cobre, lo que significa que el valor económico de interés para Pampa Camarones no pudo ser validado en este contexto.

Por otro lado, se sugiere a FOSTER continuar con el desarrollo del "Reactor Primario", proponiendo un modelo a escala que pueda ser sometido a pruebas bajo condiciones reales de operación. Estas pruebas deberían realizarse con un mineral menos variable que el de Pampa Camarones y utilizando una metodología diferente al Test EMELA®, o bien con un mayor número de pruebas simultáneas, lo cual requerirá de más personal y recursos. Además, se recomienda realizar los ensayos en instalaciones que permitan llevar a cabo un mayor número de lixiviaciones simultáneas, ya que en el Campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María, las capacidades actuales permiten entre 2 y 3 pruebas simultáneas. Un nuevo conjunto de ensayos no solo corregiría las limitaciones señaladas en esta memoria, sino que también permitiría estudiar parámetros adicionales no considerados en este estudio, como la concentración de Cu^{+2}, Fe total, y Cl^{-} en la solución lixiviante.

Capítulo 7

Bibliografía

Ácido Sulfúrico. (2024). Productos Químicos. Recuperado 3 de octubre de 2024, de https://productosquimicos.cl/producto/acido-sulfurico/

AccuWeather. (2023). Tiempo mensual en Santiago de Chile, Región Metropolitana de Santiago, Chile Octubre 2023. Recuperado 27 de septiembre de 2024, de https://www.accuweather.com/es/cl/santiago/60449/october-weather/60449?year=2023

AccuWeather. (2024). Tiempo mensual en Santiago de Chile, Región Metropolitana de Santiago, Chile Enero 2024. Recuperado 27 de septiembre de 2024, de https://www.accuweather.com/es/cl/santiago/60449/january-weather/60449?year=2024

Beckel, J. (2000, mayo). *El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile*.

Bouffard, S. (2004). REVIEW OF AGGLOMERATION PRACTICE AND FUNDAMENTALS IN HEAP LEACHING. *Mineral Processing Extractive Metall.*, 26, 233-294. https://doi.org/10.1080/08827500590944009

Chamberlin, P.D., 1986. Agglomeration: cheap insurance for good recovery when heap leaching gold and silver ores. Mining Engineering 38 (12), 1105–1109

Chang, R. (2020). *Química*. McGraw-Hill/Interamericana Editores.

COCHILCO. (2017). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades* (DEPP 17/2017). Gobierno de Chile.

COCHILCO. (2022). *Anuario de Estadísticas del cobre y Otros Minerales* (ISSN 0716-8462). Gobierno de Chile.

COCHILCO. (2024). Producción de cobre de mina por empresa anual.

Cloruro de sodio industrial (Sal) | Química industrial. (2024, 19 junio). Quimica Industrial. Recuperado 3 de octubre de 2024, de https://quimicaindustrial.cl/producto/cloruro-de-sodio-industrial/

Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales. (2023). Caracterización física de minerales y líquidos: Guía de Laboratorio Nº 1. Universidad Técnica Federico Santa María.

Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales. (2023). Cinética de lixiviación agitada:

Guía de Laboratorio Nº 2. Universidad Técnica Federico Santa María.

Dhawan, N., Safarzadeh, M. S., Miller, J. D., Moats, M. S., & Rajamani, R. K. (2013). Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations. *Miner. Eng.*, 41, 53-70.

ENEL. (2024). Personas - información útil - tarifas. enel.cl. Recuperado 21 de octubre de 2024, de https://www.enel.cl/es/clientes/tarifas-y-regulacion/tarifas.html

González, D. (2016). *Estudio de condiciones de pretratamiento y lixiviación en ambientes salinos para minerales sulfurados de cobre*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Griem, W. (2020). *Apuntes Depósitos Minerales: Zona de oxidación*. https://www.geovirtual2.cl/depos/000oxida01.htm

Ipinza, J. (2017, 4 agosto). Lixiviación de Minerales de Cobre Usando Cloruro de Sodio Sólido y Salmueras [Diapositivas]. Capacitación Especializada En Ingeniería, Chile.

Ipinza, J. (2019). *Introducción Tópicos Avanzados en Procesamiento de Minerales*.

Ipinza, J. (2022, agosto). *Extracción Máxima de Especies por Lixiviantes Agresivos (EMELA®)*.

Ipinza, J., & FOSTER ING. (2023). Lixiviación Clorurada: Un Camino a Seguir Frente al Agotamiento de Reservas de Óxidos. FOSTER ING. https://fosteringenieros.com/wp-content/uploads/2023/03/newsletter-3.pdf

Ipinza, J., García, F., Ibáñez, J., & Engdah, O. (2018, abril). Avances en la Tecnología de Pretratamiento de Minerales Sulfurados Mediante Reactor de Mezcla Trifásica®.

Jansen, M., & Taylor, A. (2003). *OVERVIEW OF GANGUE MINERALOGY ISSUES IN OXIDE COPPER HEAP LEACHING*. https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/06/HEAP-LEACHING-Mineralogy.pdf

Jara, J. (2011). Lixiviación de oro y plata de un concentrado de mina Bacis a condiciones normales y en reactor a presión [Universidad de Sonora].

Jo, M., Bondis, L., Eyzaguirre, D., Herrera, E., Lagno, F., Carreño, H., & Salhe, M. C. (2022, noviembre). Mass and Energy Balance METSIM Modeling of a Copper Sulfide Heap Leaching. *Copper International Conference*.

Lu, Z. Y., Jeffrey, M. I., & Lawson, F. (2000, junio). The effect of chloride ions on the dissolution of chalcopyrite in acidic solutions. *Hydrometallurgy*, 56(2), 189-202.https://doi.org/10.1016/s0304-386x(00)00075-x

Marín Escalona, L. (2007, julio). *Aglomerado y Curado en el Proceso de Lixiviación de Minerales*.

Mihovilovic, E. M. D. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*.

MMA Gobierno de Chile. (2024). *Norma de emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico – Normas*. https://normasaire.mma.gob.cl/nambientales/normas-de-emision/norma-de-emision-para-fundiciones-de-cobre-y-fuentes-emisoras-de-arsenico/

Muñoz, M. J. (2016, 28 julio). Extracción de metales por pirometalurgia: Procesamiento de

hierro, acero, cobre y aluminio. https://riunet.upv.es/handle/10251/68339

Ortega, F. (2019). *ESTUDIO DEL EFECTO QUE PRODUCE UN PRETRATAMIENTO REALIZADO EN UN REACTOR DE MEZCLA TRIFÁSICA, EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE PARA MINERALES SULFURADOS*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Ortiz, J. M. (2022, abril). El futuro de la lixiviación clorurada en la minería del cobre. *Minerals engineering*.https://www.mch.cl/columnas/el-futuro-de-la-lixiviacion-clorurada-en-la-mineria-del-cobre/

Pampa Camarones. (2023, septiembre). *Quiénes somos - Pampa Camarones*. https://www.pampacamarones.cl/quienes-somos/

Pampa Camarones. (2023, agosto). *Operaciones - Pampa Camarones*.https://www.pampacamarones.cl/operaciones/

Quipe, N. (2014). *Estudio electroquímico preliminar del mecanismo cinético de la lixiviación de calcopirita en medio ácido sulfúrico- cloruro de sodio*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Villela, D. (2017, agosto). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.https://www.cochilco.cl/Listado %20Temtico/sulfuros %20primarios _desaf %C3 %ADos %20y %20oportunidades.pdf

Sagredo, F. (2021). ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA EL AHORRO DE AGUA Y AUMENTO EN LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS [Tesis de Magister, Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/182258/Alternativa-tecnologica-para-el-ahorro-de-agua-y-aumento-en-la-recuperacion-de-cobre-en-procesos- hidrometalurgicos.pdf?sequence=1.

Verdejo, R. (2022, 24 enero). Fundición de Paipote rebasó casi en 500 % la norma de calidad del aire: índices de dióxido de azufre son más altos que en crisis de Puchuncaví. CIPER Chile. https://www.ciperchile.cl/2022/01/24/fundicion-de-paipote-rebaso-casi-en-500-la-norma-de-calidad-del-aire-indices-de-dioxido-de-azufre-son-mas-altos-que-en-crisis-de-puchuncavi/

Anexos

Anexo A. Masa de muestras

La Tabla A.1 muestra las masas medidas para todas las muestras de mineral tanto M1 como M2.

Tabla A.1: Masa de muestras M1 y M2

N° Muestra	Masa M1 [g] $\pm 0,01$	Masa M2 [g] $\pm 0,01$
1	197,28	204,75
2	195,82	200,87
3	204,65	200,64
4	201,56	194,50
5	201,26	194,39
6	204,02	194,11
7	201,50	196,14
8	213,06	191,76
9	209,74	196,43
10	204,08	192,13
11	205,39	198,55
12	200,68	190,17
13	196,19	186,62
14	204,66	190,39
15	195,77	208,80
16	198,57	199,24
17	205,53	207,65
18	203,12	191,40
19	198,80	199,08
20	199,89	203,75
21	209,14	188,06
22	207,10	197,21

Anexo B. Error de propagación

B.1. Error de propagación de densidad aparente

La densidad (ρ) se calcula como la relación entre la masa (m) y el volumen (V):

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Si tanto la masa como el volumen tienen un error asociado, la ecuación para el error relativo en la densidad es:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}$$

Donde:

- Δm es el error absoluto de la masa.
- ΔV es el error absoluto del volumen.
- $\Delta\rho$ es el error absoluto en la densidad.

El error absoluto en la densidad ($\Delta\rho$) se puede calcular como:

$$\Delta\rho = \rho \times \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}$$

Finalmente, sustituyendo la densidad calculada ($\rho = \frac{m}{V}$) en la ecuación, obtenemos:

$$\Delta\rho = \frac{m}{V} \times \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}$$

B.2. Error de propagación de densidad real

La densidad real (ρ) se define como:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)}$$

Donde:

- m_1 es la masa de picnómetro vacío.
- m_2 es la masa de picnómetro con mineral cubriendo la base de picnómetro.
- m_3 es la masa de mineral con mineral mezclado con agua destilada hasta cubrir picnómetro por completo .
- m_4 es la masa de picnómetro lleno de agua destilada.

Para calcular el error de propagación de la densidad, utilizamos la regla de propagación de errores para la división. La expresión para el error absoluto en la densidad ($\Delta\rho$) se calcula

de la siguiente manera:

Se calculan los errores realizando un cambio de variables en A y B:

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta m_2)^2 + (\Delta m_1)^2}$$

$$\Delta B = \sqrt{(\Delta m_4)^2 + (\Delta m_1)^2 + (\Delta m_3)^2 + (\Delta m_2)^2}$$

Considerando esto, se puede saber que el error de la densidad real corresponde a la siguiente fórmula de error relativo:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}$$

$$\Delta\rho = \rho \times \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}$$

Y reemplazando por los valores originales se tiene que:

$$\Delta\rho = \rho \times \sqrt{\left(\frac{\sqrt{(\Delta m_2)^2 + (\Delta m_1)^2}}{m_2 - m_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{(\Delta m_4)^2 + (\Delta m_1)^2 + (\Delta m_3)^2 + (\Delta m_2)^2}}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)}\right)^2}$$

B.3. Error de propagación de densidad real promedio

La densidad promedio (ρ_{promedio}) se define como:

$$\rho_{\text{promedio}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

Donde:

- ρ_1 es la primera densidad, con su error asociado $\Delta\rho_1$.
- ρ_2 es la segunda densidad, con su error asociado $\Delta\rho_2$.

Para calcular el error de propagación de la densidad promedio, aplicamos la regla de propagación de errores.

$$\Delta(\rho_1 + \rho_2) = \sqrt{(\Delta\rho_1)^2 + (\Delta\rho_2)^2}$$

Considerando esto, se puede saber que el error de la densidad real promedio corresponde a la siguiente fórmula de error relativo:

$$\frac{\Delta\rho_{\text{promedio}}}{\rho_{\text{promedio}}} = \frac{\Delta(\rho_1 + \rho_2)}{\rho_1 + \rho_2}$$

Por lo que el error absoluto en la densidad promedio es:

$$\Delta\rho_{\text{promedio}} = \frac{1}{2} \times \sqrt{(\Delta\rho_1)^2 + (\Delta\rho_2)^2}$$

B.4. Error de propagación de humedad natural

La humedad natural (H_N) se define como:

$$H_N = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

Donde:

- m_1 es la masa de mineral natural.
- m_2 es la masa de mineral seca.

Para calcular el error de propagación de H_N, aplicamos la regla de propagación de errores, dado que tanto m_1 como m_2 tienen errores asociados (Δm_1 y Δm_2).

Se calculan los errores realizando un cambio de variables en $A : A = m_1 - m_2$

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta m_1)^2 + (\Delta m_2)^2}$$

El error relativo en H_N se calcula como:

$$\frac{\Delta H_N}{H_N} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2}$$

Finalmente, el error absoluto en la humedad natural se obtiene multiplicando el error relativo por H_N:

$$\Delta H_N = H_N \times \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2}$$

Y reemplazando por los valores originales se tiene que:

$$\Delta H_N = H_N \times \sqrt{\left(\frac{\sqrt{(\Delta m_1)^2 + (\Delta m_2)^2}}{m_1 - m_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2}$$

B.5. Error de propagación de humedad de impregnación

La humedad de impregnación (H_I) se define como:

$$H_I = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

Donde:

- m_1 es la masa de mineral humedecido.
- m_2 es la masa de mineral natural.

Para calcular el error de propagación de H_I, aplicamos la regla de propagación de errores, dado que tanto m_1 como m_2 tienen errores asociados (Δm_1 y Δm_2).

Se calculan los errores realizando un cambio de variables en $A : A = m_1 - m_2$

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta m_1)^2 + (\Delta m_2)^2}$$

El error relativo en H_I se calcula como:

$$\frac{\Delta H_I}{H_I} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2}$$

Finalmente, el error absoluto en la humedad de impregnación se obtiene multiplicando el error relativo por H_I:

$$\Delta H_I = H_I \times \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2}$$

Y reemplazando por los valores originales se tiene que:

$$\Delta H_I = H_I \times \sqrt{\left(\frac{\sqrt{(\Delta m_1)^2 + (\Delta m_2)^2}}{m_1 - m_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2}$$

B.6. Error de propagación de consumo de ácido estándar

El Consumo Estándar de Ácido (CEA) se define como:

$$CEA = \frac{V_{\text{ácido}} - \rho_{\text{ácido}}}{m_{\text{mineral}}} \times 100$$

Donde:

- $V_{\text{ácido}}$ es el volumen de ácido.
- $\rho_{\text{ácido}}$ es la densidad del ácido.
- m_{mineral} es la masa del mineral.

Para calcular el error de propagación del CEA, aplicamos la regla de propagación de errores.

Se calculan los errores realizando un cambio de variables en A :

$$A = V_{\text{ácido}} - \rho_{\text{ácido}}$$

Se debe considerar que no existe error instrumental de la densidad del ácido.

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta V_{\text{ácido}})^2}$$

El error relativo en el CEA se calcula como:

$$\frac{\Delta CEA}{CEA} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_{\text{mineral}}}{m_{\text{mineral}}}\right)^2}$$

Finalmente, el error absoluto en el CEA es:

$$\Delta CEA = CEA \times \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_{\text{mineral}}}{m_{\text{mineral}}}\right)^2}$$

Y reemplazando por los valores originales se tiene que:

$$\Delta CEA = CEA \times \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{\text{ácido}}}{V_{\text{ácido}} - \rho_{\text{ácido}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_{\text{mineral}}}{m_{\text{mineral}}}\right)^2}$$

B.7. Error de propagación de consumo de ácido estándar promedio

El Consumo Estándar de Ácido promedio (CEA_{promedio}) se define como:

$$CEA_{\text{promedio}} = \frac{CEA_1 + CEA_2 + CEA_3 + CEA_4}{4}$$

Donde:

- CEA_1, CEA_2, CEA_3, y CEA_4 son los valores de Consumo Estándar de Ácido, con sus respectivos errores asociados ΔCEA_1, ΔCEA_2, ΔCEA_3, y ΔCEA_4.

Para calcular el error de propagación del promedio de CEA, aplicamos la regla de propagación de errores.

$$\Delta(CEA_1+CEA_2+CEA_3+CEA_4) = \sqrt{(\Delta CEA_1)^2 + (\Delta CEA_2)^2 + (\Delta CEA_3)^2 + (\Delta CEA_4)^2}$$

Se considera el error relativo en el promedio de CEA como:

$$\frac{\Delta CEA_{\text{promedio}}}{CEA_{\text{promedio}}} = \frac{\Delta(CEA_1 + CEA_2 + CEA_3 + CEA_4)}{CEA_1 + CEA_2 + CEA_3 + CEA_4}$$

Se considera el error absoluto en el promedio de CEA como:

$$\Delta CEA_{\text{promedio}} = \frac{1}{4} \times \sqrt{(\Delta CEA_1)^2 + (\Delta CEA_2)^2 + (\Delta CEA_3)^2 + (\Delta CEA_4)^2}$$

Anexo C. Volumen de ácido en ensayo de CEA

La Tabla C.1 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabilizara en el primer ensayo CEA de M1.

Tabla C.1: Volumen de ácido utilizado en prueba 1 de M1

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 ±0, 001	8,56 ±0, 01	
2	0,150 ±0, 001	5,23 ±0, 01	6,08 ±0, 01
3	0,300 ±0, 001	2,66 ±0, 01	4,76 ±0, 01
4	0,300 ±0, 001	2,17 ±0, 01	3,82 ±0, 01
5	0,300 ±0, 001	1,75 ±0, 01	1,77 ±0, 01
Total	1,05 ±0, 001		

La Tabla C.2 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabilizara en el segundo ensayo CEA de M1.

Tabla C.2: Volumen de ácido utilizado en prueba 2 de M1

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 ±0, 001	8,55 ±0, 01	
2	0,300 ±0, 001	2,38 ±0, 01	4,55 ±0, 01
3	0,300 ±0, 001	1,80 ±0, 01	2,16 ±0, 01
4	0,150 ±0, 001	1,91 ±0, 01	2,00 ±0, 01
Total	0,750 ±0, 001		

La Tabla C.3 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabilizara en el tercer ensayo CEA de M1.

Tabla C.3: Volumen de ácido utilizado en prueba 3 de M1

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 ±0, 001	8,58 ±0, 01	
2	0,300 ±0, 001	2,93 ±0, 01	5,70 ±0, 01
3	0,150 ±0, 001	2,66 ±0, 01	4,87 ±0, 01
4	0,150 ±0, 001	2,43 ±0, 01	4,31 ±0, 01
5	0,150 ±0, 001	2,30 ±0, 01	3,56 ±0, 01
6	0,150 ±0, 001	2,26 ±0, 01	2,29 ±0, 01
Total	0,900 ±0, 001		

La Tabla C.4 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabi-

lizara en el cuarto ensayo CEA de M1.

Tabla C.4: Volumen de ácido utilizado en prueba 4 de M1

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 $\pm 0,001$	8,51 $\pm 0,01$	
2	0,150 $\pm 0,001$	4,17 $\pm 0,01$	5,97 $\pm 0,01$
3	0,150 $\pm 0,001$	3,12 $\pm 0,01$	5,18 $\pm 0,01$
4	0,150 $\pm 0,001$	2,47 $\pm 0,01$	4,42 $\pm 0,01$
5	0,150 $\pm 0,001$	2,43 $\pm 0,01$	4,03 $\pm 0,01$
6	0,150 $\pm 0,001$	2,30 $\pm 0,01$	2,47 $\pm 0,01$
Total	0,750 $\pm 0,001$		

La Tabla C.5 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabilizara en el primer ensayo CEA de M2.

Tabla C.5: Volumen de ácido utilizado en prueba 1 de M2

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 $\pm 0,001$	8,58 $\pm 0,01$	
2	0,150 $\pm 0,001$	5,45 $\pm 0,01$	6,88 $\pm 0,01$
3	0,150 $\pm 0,001$	4,28 $\pm 0,01$	6,08 $\pm 0,01$
4	0,150 $\pm 0,001$	2,94 $\pm 0,01$	5,04 $\pm 0,01$
5	0,150 $\pm 0,001$	2,54 $\pm 0,01$	4,47 $\pm 0,01$
6	0,150 $\pm 0,001$	2,39 $\pm 0,01$	4,00 $\pm 0,01$
7	0,150 $\pm 0,001$	2,35 $\pm 0,01$	3,47 $\pm 0,01$
8	0,150 $\pm 0,001$	2,26 $\pm 0,01$	2,38 $\pm 0,01$
Total	1,050 $\pm 0,001$		

La Tabla C.6 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabilizara en el segundo ensayo CEA de M2.

Tabla C.6: Volumen de ácido utilizado en prueba 2 de M2

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 $\pm 0,001$	8,60 $\pm 0,01$	
2	0,300 $\pm 0,001$	4,18 $\pm 0,01$	6,59 $\pm 0,01$
3	0,300 $\pm 0,001$	2,39 $\pm 0,01$	4,51 $\pm 0,01$
4	0,150 $\pm 0,001$	2,44 $\pm 0,01$	4,29 $\pm 0,01$
5	0,100 $\pm 0,001$	2,51 $\pm 0,01$	4,02 $\pm 0,01$
6	0,100 $\pm 0,001$	2,56 $\pm 0,01$	3,65 $\pm 0,01$
7	0,100 $\pm 0,001$	2,46 $\pm 0,01$	2,82 $\pm 0,01$
8	0,100 $\pm 0,001$	2,23 $\pm 0,01$	2,37 $\pm 0,01$
Total	1,150 $\pm 0,001$		

La Tabla C.7 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabilizara en el tercer ensayo CEA de M2.

Tabla C.7: Volumen de ácido utilizado en prueba 3 de M2

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 $\pm 0,001$	8,54 $\pm 0,01$	
2	0,150 $\pm 0,001$	5,04 $\pm 0,01$	6,72 $\pm 0,01$
3	0,150 $\pm 0,001$	3,38 $\pm 0,01$	5,23 $\pm 0,01$
4	0,150 $\pm 0,001$	2,98 $\pm 0,01$	4,49 $\pm 0,01$
5	0,150 $\pm 0,001$	2,36 $\pm 0,01$	3,94 $\pm 0,01$
6	0,300 $\pm 0,001$	1,94 $\pm 0,01$	2,28 $\pm 0,01$
7	0,100 $\pm 0,001$	1,97 $\pm 0,01$	1,97 $\pm 0,01$
Total	1,000 $\pm 0,001$		

La Tabla C.8 muestra el volumen de ácido utilizado para que el pH de la pulpa se estabilizara en el cuarto ensayo CEA de M2.

Tabla C.8: Volumen de ácido utilizado en prueba 4 de M2

Dosis	Volumen de ácido [ml]	pH inicial	pH final
1	0,000 $\pm 0,001$	8,56 $\pm 0,01$	
2	0,300 $\pm 0,001$	5,42 $\pm 0,01$	4,98 $\pm 0,01$
3	0,150 $\pm 0,001$	2,97 $\pm 0,01$	5,51 $\pm 0,01$
4	0,150 $\pm 0,001$	2,68 $\pm 0,01$	4,37 $\pm 0,01$
5	0,300 $\pm 0,001$	2,31 $\pm 0,01$	2,56 $\pm 0,01$
6	0,150 $\pm 0,001$	2,25 $\pm 0,01$	2,34 $\pm 0,01$
Total	1,050 $\pm 0,001$		

Anexo D. Mediciones de pH y potencial REDOX

La Tabla D.1 y Tabla D.2 muestran las mediciones de pH y potencial REDOX en los ensayos de modificación de dosificación de ácido (V1).

Tabla D.1: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de dosificación de ácido (V1)

Dosificación de ácido	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
30 %	257,00	236,49	pH $\pm 0,01$	5,71	5,87	6,17	6,37	6,33	6,43	6,93	6,55	6,52	6,55	6,52	6,54
			PR [V] $\pm 0,1$	225,4	210,6	200,1	192,2	186,8	183,7	180,5	179,6	178,6	176,7	175,8	175,2
50 %	255,71	235,30	pH $\pm 0,01$	4,54	4,64	4,71	4,87	5,02	5,15	-	-	5,39	5,44	5,49	5,55
			PR [V] $\pm 0,1$	327,9	317,1	310,5	298,1	290,6	283,23	-	-	273,2	273,3	271,1	269
70 %	247,14	227,42	pH $\pm 0,01$	4,48	4,72	4,89	5,18	5,51	5,66	5,88	6,08	3,01	6,02	6,18	6,27
			PR [V] $\pm 0,1$	310,3	302,2	284,5	263,2	252,5	246,1	243,1	241,2	240,3	239,2	238,1	237,4
100 %	261,82	240,93	pH $\pm 0,01$	4,36	4,49	4,7	5,13	5,1	5,31	5,32	5,52	5,5	5,56	5,62	5,66
			PR [V] $\pm 0,1$	323	316,6	304,8	283,9	270,8	262,9	259,5	257,3	255,5	254,4	253,3	250,5

Tabla D.2: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 modificación de dosificación de ácido (V1)

Dosificación de ácido	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
30 %	245,78	226,17	pH $\pm 0,01$	5,11	5,86	6,14	6,23	6,39	6,44	6,49	6,53	6,55	6,57	6,60	6,63
			PR [V] $\pm 0,1$	292,2	217,8	199,1	190,6	187,9	186,2	185,2	184,4	183,3	182,1	181,8	181,4
50 %	273,98	252,12	pH $\pm 0,01$	3,99	4,00	3,97	4,00	4,00	-	-	4,00	4,01	4,00	4,03	4,00
			PR [V] $\pm 0,1$	383,0	377,0	380,0	384,0	391,5	-	-	393,5	394,4	395,8	396,8	397,4
70 %	222,83	205,05	pH $\pm 0,01$	5,22	5,27	5,80	6,12	6,17	6,20	6,23	5,20	5,43	6,27	6,28	6,36
			PR [V] $\pm 0,1$	245,8	213,5	201,8	192,6	187,6	184,8	182,8	181,1	180,1	179,0	177,6	177,0
100 %	250,11	230,15	pH $\pm 0,01$	4,37	4,48	4,57	4,76	4,88	4,98	5,06	5,09	5,15	5,18	5,22	5,24
			PR [V] $\pm 0,1$	339,6	329,5	322,1	309,8	301,8	296,7	293,4	291,0	289,6	288,5	287,7	287,1

La Tabla D.3 y Tabla D.4 muestran las mediciones de pH y potencial REDOX en los ensayos de modificación de dosificación de NaCl (V2).

Tabla D.3: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de dosificación de NaCl (V2)

Dosificación de NaCl	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
5 %	222,83	205,05	pH $\pm 0,01$	5,22	5,27	5,80	6,12	6,17	6,20	6,23	5,20	5,43	6,27	6,28	6,36
			PR [V] $\pm 0,1$	245,8	213,5	201,8	192,6	187,6	184,8	182,8	181,1	180,1	179,0	177,6	177,0
25 %	265,32	244,15	pH $\pm 0,01$	4,52	4,76	4,99	5,24	5,44	5,58	5,67	5,74	5,84	6,18	5,88	5,91
			PR [V] $\pm 0,1$	344,3	227,5	310,4	291,1	276,0	268,7	260,5	256,8	254,4	252,9	252,1	251,6

Tabla D.4: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 modificación de dosificación de NaCl (V2)

Dosificación de NaCl	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
5 %	224,85	206,91	pH $\pm 0,01$	4,91	5,13	5,30	5,70	5,89	5,92	5,92	5,95	6,01	6,02	6,03	6,06
			PR [V] $\pm 0,1$	292,6	271,8	258,2	241,1	234,7	231,4	230,4	229,4	229,7	229,5	229,7	229,5
25 %	260,22	239,45	pH $\pm 0,01$	4,62	4,89	5,16	5,08	5,30	5,48	5,46	5,53	5,60	5,60	5,63	5,65
			PR [V] $\pm 0,1$	347,8	344,6	328,6	300,9	286,8	278,8	274,6	271,4	269,4	268,2	266,8	266,5

La Tabla D.5 y Tabla D.6 muestran las mediciones de pH y potencial REDOX en los ensayos de modificación de temperatura de solución lixiviante (V3).

Tabla D.5: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de temperatura de solución lixiviante (V3)

Temperatura de solución	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
20°C	277,06	254,95	pH pm 0,01	4,63	4,84	5,08	5,42	5,62	5,74	5,84	5,92	5,94	5,98	6,01	6,04
40°C	277,59	255,43	pH pm 0,01	4,30	4,72	5,04	5,34	5,52	5,64	5,71	5,77	5,83	5,87	5,91	5,94

Tabla D.6: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 modificación de temperatura de solución lixiviante (V3)

Temperatura de solución	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
20°C	266,52	245,25	pH $\pm 0,01$	4,63	4,89	5,13	5,37	5,58	5,72	5,79	5,88	5,94	5,97	6,00	6,04
40°C	268,14	246,74	pH $\pm 0,01$	4,69	4,98	5,27	5,50	5,65	5,76	5,86	5,94	6,01	6,04	6,09	6,13

La Tabla D.7 y Tabla D.8muestra las mediciones de pH y potencial REDOX en los ensayos de modificación de Tiempo de reposo (V4).

Tabla D.7: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M1 modificación de tiempo de reposo (V4)

Tiempo de reposo	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
4 días	253	232,81	pH pm 0,01	4,54	4,71	4,78	4,91	5,01	5,14	5,27	5,33	5,41	5,46	5,53	5,57
25 días	252	231,89	pH pm 0,01	4,28	4,52	4,62	4,70	4,81	4,86	4,94	4,97	5,08	5,14	5,19	5,26

Tabla D.8: Medición de pH y potencial REDOX en lixiviación de M2 Modificación de tiempo de reposo (V4)

Tiempo de reposo	Masa [g]	Volumen solución [ml]	Tiempo [min]	5	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
4 días	241,1	221,86	pH $\pm 0,01$	4,63	4,77	4,91	5,08	5,22	5,32	5,45	5,51	5,56	5,63	5,70	5,74
25 días	264,7	243,58	pH $\pm 0,01$	4,18	4,44	4,55	4,64	4,75	4,82	4,90	4,97	5,08	5,16	5,22	5,28

Anexo E. Temperaturas ambiente ensayos de laboratorio

Para establecer un valor a la temperatura ambiente, se consideran los datos que contempla el sitio web de AccuWeather para el mes de octubre de 2023 (AccuWeather, 2023) y enero de 2024 (AccuWeather, 2023), las cuales se muestran en La Tabla E.1.

Tabla E.1: Temperatura ambiente para ensayos realizados en octubre de 2023 y enero de 2024

Día	Ensayos dosificación de ácido			Ensayos dosificación de NaCl		
	Fecha	Temperatura menor °C	Temperatura mayor °C	Fecha	Temperatura menor °C	Temperatura mayor °C
Día 1	05-10-23	4	20	04-01-24	13	30
Día 2	06-10-23	7	18	05-01-24	13	26
Día 3	07-10-23	4	23	06-01-24	14	27
Día 4	08-10-23	5	26	07-01-24	14	30
Día 5	09-10-23	6	27	08-01-24	14	30
Día 6	10-10-23	7	18	09-01-24	13	30
Día 7	11-10-23	5	21	10-01-24	14	30
Día 8	12-10-23	5	24	11-01-24	16	31
Día 9	13-10-23	6	27	12-01-24	13	30
Día 10	14-10-23	6	26	13-01-24	11	28
Día 11	15-10-23	6	24	14-01-24	10	34
Día 12	16-10-23	6	24	15-01-24	13	32
Día 13	17-10-23	6	28	16-01-24	11	32
Día 14	18-10-23	8	22	17-01-24	16	32
Día 15	19-10-23	5	28	18-01-24	14	33

Anexo F. Equipos

F.1. Cortador de rifles giratorio

Equipo utilizado para la separación de las muestras, asegurando una representatividad en cada una de estas, marca Labtech Hebro, modelo DRR-010V, el cual cuenta con 20 depósitos y se encuentra ubicado en la sala de preparación de muestras del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.1: Cortador de rifles giratorio Universidad Técnica Federico Santa María

F.2. Agitador mecánico

Equipo que cuenta con un motor, el cual es capaz de ajustar la velocidad de rotación, que va desde los 50 rpm hasta los 2200 rpm, permitiendo el movimiento de aspas agitadoras. Equipo de marca Dragon Lab, modelo OS20-Pro y se encuentra ubicado en la sala de preparación de muestras del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.2: Ensayo consumo de ácido estándar

F.3. Pulverizador

El equipo pulverizador marca Flsmith Essa modelo No 100318BR, disponible en la sala de preparación de muestras del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María, es utilizado para la preparación de sal pulverizada.



Figura F.3: Pulverizador Universidad Técnica Federico Santa María

F.4. Balanza digital (20 [kg])

La balanza digital marca Winkler y modelo XY20MB, permite realizar mediciones de masa de hasta 20000 [g], con un error instrumental de ± 0,01 [g], disponible en la sala de preparación de muestras del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.4: Balanza digital de 20 [kg] máximo Universidad Técnica Federico Santa María

F.5. Balanza digital (3 [kg])

La balanza digital marca y modelo JA4000C, permite realizar mediciones de masa de hasta 3000 [g], con un error instrumental de m 0,01 [g], disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.5: Balanza digital de 3 [kg] máximo Universidad Técnica Federico Santa María

F.6. Balanza digital (0,5 [kg])

La balanza digital marca blanca, permite realizar mediciones de masa de hasta 500 [g], con un error instrumental de ± 0,1 [g], de propiedad y uso personal.

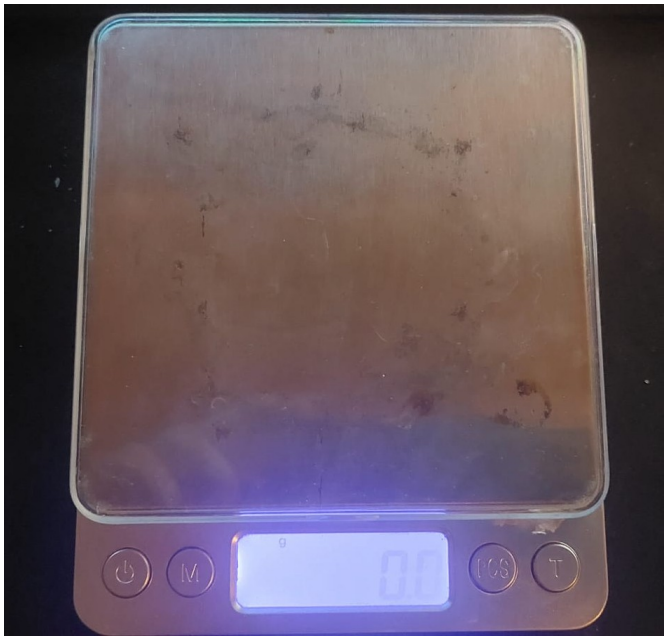


Figura F.6: Balanza digital de 0,5 [kg] máximo

F.7. Balanza analítica

La balanza digital marca Joanlab y modelo FA2204N, permite realizar mediciones de masa de hasta 220 [g], con un error instrumental de ± 0,0001 [g], disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.7: Balanza analítica

F.8. Probeta 250 [ml]

La balanza digital marca Scharlau, modelo BORO 3.3, permite realizar mediciones de volumen de hasta 25 [ml], con un error instrumental de ± 1 [ml], disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.

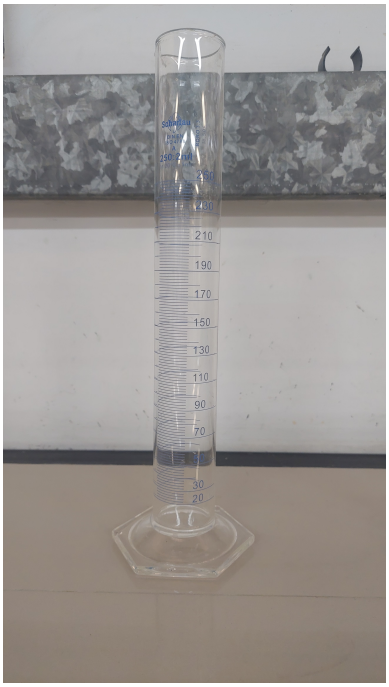


Figura F.8: Balanza digital de [ml]

F.9. Bomba centrifuga

La bomba centrifuga marca Boeco Germany, modelo R300, permite bombear fluidos mediante presión en un rango de 0 a 100 [kPa], disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas y utilizado en la planta piloto de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.9: Bomba centrifuga Universidad Técnica Federico Santa María

F.10. Micropipeta

La micropipeta marca Dragon Lab, con capacidad entre 100 a 1000 [μ l], disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas y utilizada en la planta piloto de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.10: Micropipeta Universidad Técnica Federico Santa María

F.11. Placa calefactora

La placa calefactora marca LLLABB, modelo SH-2, permite calefaccionar soluciones liquidas hasta los 100°C, disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas y utilizada en la planta piloto de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.11: Placa calefactora Universidad Técnica Federico Santa María

F.12. Estufa

Equipo marca Edemet, para el secado de muestras, permitiendo alcanzar temperaturas de hasta 200°C y con un consumo de 900 [Wh], ubicado en la planta piloto del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.

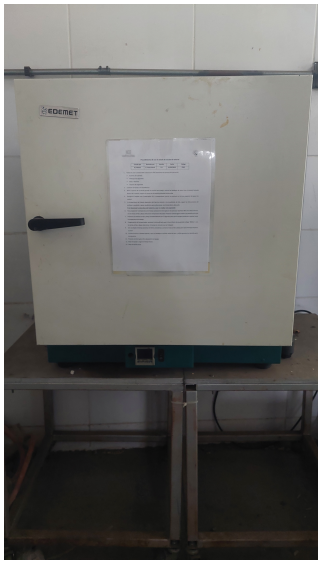


Figura F.12: Estufa de laboratorio Universidad Técnica Federico Santa María

F.13. Medidor de pH

Instrumento para la medición de pH marca Thermo Scientific modelo Orion Star A211, permite medir el pH de una solución con un error instrumental ± 0,01, disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas y utilizado en la planta piloto de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.

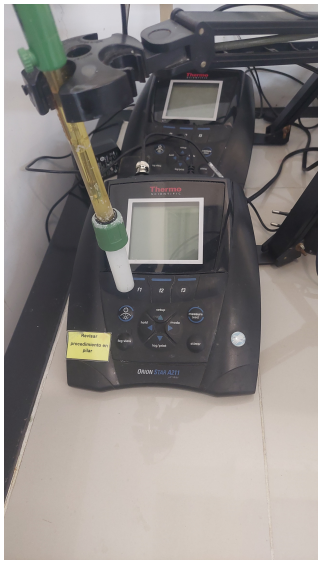


Figura F.13: Medidor de pH Universidad Técnica Federico Santa María

F.14. Medidor de potencial REDOX

Instrumento para la medición de potencial REDOX marca Hanna Instruments modelo HI 2211, permite medir el potencial REDOX de una solución utilizando un medidor de platino, con un error instrumental ± 0,1 [V], disponible en la sala de hidrometalurgia del laboratorio de Ingeniería Civil de Minas y utilizado en la planta piloto de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura F.14: Medidor de potencial REDOX Universidad Técnica Federico Santa María