

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



“INTEGRACIÓN DE UN MODELO DE VALORIZACIÓN
ECONÓMICA EN LA GENERACIÓN DE UN PLAN DE
RIEGO ÓPTIMO PARA PILAS DE LIXIVIACIÓN EN
SULFUROS DE COBRE”

IGNACIA PAZ CONTRERAS NAVARRO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL DE MINAS

Profesor guía

DR. ENRIQUE JÉLVEZ

Profesor Correferente

CARLOS HUNT

JUNIO – 2024

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Magaly y Patricio, por haberme dado siempre la mejor educación que estuvo a su alcance. Agradezco a mi madre por siempre cuidarme mientras estudiaba, agradezco a mi padre por todas las veces que me fue a dejar y a buscar a la universidad y por todas las veces que escuchó todo lo que le hablaba sobre mi carrera y mis ramos. Gracias a ambos por apoyarme y nunca dejar que me faltara nada para poder llevar a cabo mis estudios.

A Benjamín, porque sin ti difícil que lo hubiese logrado. Gracias por todas las noches de estudio en las que me acompañaste, por preocuparte de mí, por no dejar que me rindiera, por siempre creer en mí, hasta cuando yo no creía. Gracias por levantarme cuando me quedaba dormida de cansancio, por contenerme cuando no me daba la mente, por alegrarme cuando estaba triste. Gracias por tu amor incondicional, eres mi pilar fundamental.

A mi Catita, gracias por tu amor y por siempre creer que soy la mas inteligente. Eres mi lucecita.

A mis amigas y amigos, gracias por todos los momentos que pasamos en la universidad, por las tardes de estudio, por los desvelos para llegar a un certamen, por el apoyo, por las risas y por seguir en mi vida de alguna forma, cerca o lejos, los recuerdo con cariño siempre. Daniela H., Nicolás C., Benjamín N., Carla G., Felipe M., David Z., Felipe O., Camilo A.. Y a todas las personas lindas que conocí en la universidad que me brindaron una palabra de apoyo en algún momento.

A mis profesores guía, Enrique Jélvez, gracias por que a pesar de todo creyó en mi trabajo. Gracias profesor Carlos Hunt, por la comprensión que siempre tuvo conmigo. También me gustaría agradecer al profesor Marcelo Pérez, una gran persona y un gran profesor. Gracias profe por creer en mí siempre, por ver mis capacidades, por llevarme a desafíos y por siempre haberme apoyado en esos procesos.

A los integrantes del laboratorio Delphos donde desarrollé mi trabajo de memoria, por la oportunidad, por la excelente disposición y la buena onda.

Finalmente, agradezco el financiamiento que recibí del Advanced Mining Technology Center (AMTC) a través del Fondo Basal ANID/PIA Proyecto AFB220002 y AFB230001, además del Proyecto FONDEF/CONICYT IDeA I+D 2019 ID19I10202.

Dedicatoria

Para ti, que lograste vivir para llegar aquí.

*Last but not least, I wanna thank me
I wanna thank me for believing in me
I wanna thank me for doing all this hard work
I wanna thank me for having no days off
I wanna thank me for, for never quitting*

Resumen

La explotación creciente de sulfuros de cobre y el agotamiento gradual de los óxidos en Chile resaltan la necesidad de implementar métodos de procesamiento que sean sostenibles y económicamente viables. La lixiviación en pilas se perfila como una alternativa prometedora debido a su menor impacto ambiental. Sin embargo, los minerales sulfurados de cobre presentan desafíos considerables debido a su resistencia a la disolución. Actualmente, en el marco del proyecto Fondef ID19I10202 “Modelo fenomenológico integrado de lixiviación en pilas de sulfuros: desde la teoría a la aplicación industrial”, un modelo de optimización se utiliza para planificar el riego óptimo basándose en un modelo fenomenológico, pero su enfoque en maximizar la recuperación de mineral sin incluir criterios económicos limita su aplicación práctica en la industria minera.

Para abordar esta limitación, el presente trabajo de memoria desarrolló una valorización económica del proceso de lixiviación en pilas para minerales sulfurados de cobre e integró esta valorización a un modelo de optimización preexistente. El objetivo es generar planes de riego que maximizan el flujo de caja durante todo el horizonte de planificación. Se investigaron los métodos de lixiviación bacteriana y lixiviación en medio cloruro para identificar las variables clave y los parámetros asociados a los costos del proceso de lixiviación, específicamente orientado a sulfuros de cobre. Con estos factores económicos se generó un modelo matemático que caracteriza el flujo de caja descontado del proceso, el cual se integró al modelo de optimización como una nueva función objetivo de maximización en la toma de decisiones del modelo para producir el plan de riego óptimo.

El modelo resultante fue alimentado con datos de la industria minera y generó planes de riego óptimos ajustados a las condiciones operativas, proporcionando valores precisos de flujo de caja neto. Los resultados indicaron que el modelo propuesto puede ofrecer un enfoque eficiente para maximizar el flujo de caja, capturando el valor económico potencial de la operación. Además, un análisis comparativo con una metodología de riego Greedy reveló que la optimización basada en la valorización económica permite un rendimiento superior, mientras que un análisis de sensibilidad confirmó la solidez del modelo frente a cambios en las variables económicas.

En conclusión, la integración de un modelo de valorización económica en la planificación del riego para la lixiviación en pilas ofrece una mejora sustancial. Este enfoque proporciona a las empresas mineras una herramienta optimizada que puede maximizar la utilidad de sus operaciones, ajustando los planes de riego a las condiciones económicas y operativas cambiantes.

Palabras clave: lixiviación en pilas, sulfuros de cobre, modelo de optimización, planes de riego, valorización económica, maximización del flujo de caja, análisis económico.

Abstract

The increasing exploitation of copper sulfides and the gradual depletion of oxides in Chile highlight the need to implement processing methods that are sustainable and economically viable. Heap leaching is emerging as a promising alternative due to its lower environmental impact. However, copper sulfide ores present significant challenges due to their resistance to dissolution. Currently, within the framework of the Fondef ID19I10202 project "Integrated Phenomenological Model of Heap Leaching of Sulfides: From Theory to Industrial Application," an optimization model is used to plan optimal irrigation based on a phenomenological model, but its focus on maximizing mineral recovery without including economic criteria limits its practical application in the mining industry.

To address this limitation, the present thesis developed an economic valuation of the heap leaching process for copper sulfide ores and integrated this valuation into a pre-existing optimization model. The objective is to generate irrigation plans that maximize cash flow throughout the entire planning horizon. Bacterial leaching and chloride media leaching methods were investigated to identify key variables and parameters associated with leaching process costs, specifically oriented towards copper sulfides. With these economic factors, a mathematical model was generated that characterizes the discounted cash flow of the process, which was integrated into the optimization model as a new objective function for decision-making in the model to produce the optimal irrigation plan.

The resulting model was fed with data from the mining industry and generated optimal irrigation plans tailored to operational conditions, providing accurate net cash flow values. The results indicated that the proposed model offer an efficient approach to maximize cash flow, capturing the potential economic value of the operation. Moreover, a comparative analysis with a Greedy irrigation methodology revealed that optimization based on economic valuation allows for superior performance, while a sensitivity analysis confirmed the robustness of the model against changes in economic variables.

In conclusion, the integration of an economic valuation model into irrigation planning for heap leaching offers a substantial improvement. This approach provides mining companies with an optimized tool that can maximize the profitability of their operations by adjusting irrigation plans to varying economic and operational conditions.

Keywords: heap leaching, copper sulfides, optimization model, irrigation plans, economic valuation, cash flow maximization, economic analysis.

Tabla de contenidos

I. INTRODUCCIÓN	11
1. Antecedentes generales	11
2. Contexto y problemática	13
3. Justificación del trabajo	14
4. Objetivos	15
4.1 Objetivo general del trabajo	15
4.2 Objetivos específicos	15
5. Alcances y limitaciones	15
6. Organización del trabajo	16
II. ANTECEDENTES	17
1. Marco teórico	17
1.1 Lixiviación de minerales sulfurados de cobre	17
1.2 Lixiviación en pilas	22
1.3 Valorización económica en pilas de lixiviación	30
1.4 Optimización de riego en pilas de lixiviación	33
2. Estado del arte	43
III. METODOLOGÍA	45
1. Valorización económica para lixiviación en pilas de sulfuros de cobre	45
1.1 Identificación y caracterización de factores económicos	45
1.2 Desarrollo valorización económica: ecuaciones	47
2. Modelo de Optimización: enfoque económico	52
2.1 Integración valorización económica en modelo de optimización	52
2.2 Evaluación de la efectividad del modelo	60
3. Resumen esquemático de la metodología	63
IV. CASO DE ESTUDIO	65
1. Descripción escenario de estudio	65
1.1 Generalidades	65
1.2 Construcción y operación de la pila	66
2. Simulación de escenario de referencia	69
3. Optimización del riego y valorización	69
4. Evaluación de la efectividad del modelo	71
4.1 Validación costos	71
4.2 Caso referencia: algoritmo Greedy	71
4.3 Caso análisis sensibilidad	72
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
1. Plan de riego	73
2. Comparación con método Greedy	76
3. Análisis de sensibilidad	78
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXO	87

Índice de tablas

Tabla 1: Tipos de minerales sulfurados de cobre y su presencia en la corteza terrestre de Chile. Fuente: Codelco, Cochilco.....	18
Tabla 2: Propiedades del mineral a lixiviar. Fuente: Elaboración propia (2023).....	65
Tabla 3: Características de pila de lixiviación a simular. Fuente: Elaboración propia (2023).....	65
Tabla 4: Parámetros del modelo de optimización para la valorización económica de los módulos que componen la pila. Sn es acrónimo de solución. Fuente: Elaboración propia (2023).....	69
Tabla 5: Distribución de costos porcentual para lixiviación según referencia industria (Cochilco) y valorización económica del modelo de optimización. Referencia: Cochilco, Caracterización de los costos de la gran minería.....	71
Tabla 6: Parámetros y sus rangos de variación para análisis de sensibilidad del modelo integrado, en función de factores económicos.....	72
Tabla 7: Comparación de resultados de la optimización en el riego según metodología de modelo optimización versus método greedy.	77
Tabla 8: Dimensiones y volúmenes de pila de lixiviación, caso sulfuros de cobre.....	87
Tabla 9: Tabla extendida con pasos/saltos para el análisis sensibilidad.....	91

Índice de figuras

Figura 1: Etapas del proceso productivo para minerales de cobre, desde su extracción in situ hasta la obtención de producto final. Fuente: Elaboración propia (2023).	12
Figura 2: Vista aérea de una pila de lixiviación. Fuente: AG Solutions	22
Figura 3: Pila de lixiviación estática discretizada en módulos y con riego, carga de material y zonas de recolección de solución enriquecida.	24
Figura 4: Esquema de pila dinámica de lixiviación (on/off).	24
Figura 5: Formación de una pila de lixiviación con mineral de cobre previamente chancado. A la izquierda el material es acopiado por camiones. A la derecha el material se acopia por correa transportadora. Fuente: Alan J. Breitenbach SME.	25
Figura 6: Esquema de un circuito típico de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre. Fuente: Petersen (2015).	26
Figura 7: Pila de lixiviación instalada sobre carpeta de geomembrana. Fuente: Agua Royal Spring.	26
Figura 8: Válvula de control hidráulico instalado en el sistema de riego de una pila de lixiviación, que obtiene datos del flujo de solución lixivante. Fuente: BANFF S.A. ...	27
Figura 9: Sistema de riego sobre una pila de mineral. Fuente: BANFF S.A.	27
Figura 10: Sistema de drenaje en la base de una pila de lixiviación para recolectar PLS. Fuente: ReliXwater.	28
Figura 11: Interacción bidireccional entre el modelo de balance de masa dinámico y el modelo de optimización en la lixiviación de cobre.	34
Figura 12: Diagrama de la pila de lixiviación múltiple y de la pila de lixiviación completa.	36
Figura 13: Principales resultados de la etapa 1. Recuperación de cobre (izquierda) y consumo de ácido (derecha). Fuente: Silva (2022)	36
Figura 14: Representación esquemática de una pila de lixiviación discretizada en módulo. Fuente: Silva (2022)	38
Figura 15: Esquema de construcción y enumeración de los módulos del primer piso de la pila caso óxidos de cobre. Fuente: Silva (2022)	40
Figura 16: Períodos de disponibilidad para el riego de cada módulo de una pila de óxidos de cobre. Fuente: Silva (2022)	41
Figura 17: Plan de riego caso óxidos de cobre, entregado por modelo de optimización para $TR=7.5$ [L/h/m ²] y disponibilidad $Q=5000$ [UR]. Fuente: Silva (2022)	42
Figura 18: Curva de recuperación de cobre en el tiempo para el caso de estudio de una pila de óxidos de cobre.	53
Figura 19: Esquema de coordenadas xz para transporte hidráulico en pila de lixiviación, aplicable al modelo de optimización preexistente.	55
Figura 20: Vista de planta de coordenadas xy, para transporte hidráulico en pila de lixiviación, aplicable al modelo de optimización preexistente. Cada cuadrado representa un módulo mj.	56
Figura 21: Esquema resumen de la metodología empleada para el desarrollo de una valorización económica y su integración en un modelo de optimización.	64
Figura 22: Vista general pila de sulfuros a estudiar.	66
Figura 23: Geometría de un módulo de riego.	66
Figura 24: Patrón de construcción de módulos de optimización para la pila de lixiviación de estudio.	67
Figura 25: Enumeración de módulos y áreas de riego en el primer piso de la pila de sulfuros.	67

Figura 26: Disponibilidad de riego por periodos para cada área de riego definida de la pila de estudio durante todo el tiempo de análisis de 150 meses.	68
Figura 27: Plan de riego generado por modelo optimización con valorización económica para sulfuros de cobre, $Q=10.000$ ton/d y $TR=7.5$ L/h/m ² , para 150 meses.	73
Figura 28: Comparativa de gestión del riego: Plan optimizado versus Disponibilidad inicial por pisos.....	74
Figura 29: Vista general malla pila de sulfuros a estudiar (línea negra) superpuesta con módulos de optimización (línea roja).	87
Figura 30: Enumeración de módulos y áreas de riego en el segundo piso de la pila de sulfuros. Fuente: Elaboración propia (2023).	88
Figura 31: Enumeración de módulos y áreas de riego en el tercer piso de la pila de sulfuros. Fuente: Elaboración propia (2023).	88
Figura 32: Ejecución escenario de referencia para distintos meses hasta el agotamiento de los módulos. Por cada caso se muestra la saturación del lecho (superior), ley de calcopirita (centro) y concentración de cobre soluble (inferior).	89
Figura 33: Curvas de producción obtenidas para escenarios de referencia.	90

Índice de gráficos

Gráfico 1: Flujo descontado acumulado modelo optimización vs algoritmo greedy.	76
Gráfico 2: Análisis de sensibilidad de seis parámetros para el modelo de optimización. En el eje horizontal, se presenta la variación porcentual de cada parámetro, que oscila entre una disminución del 100% y un aumento del 100%. El eje vertical cuantifica el flujo descontado acumulado en millones de dólares para cada caso analizado.....	79

I. Introducción

1. Antecedentes generales

La minería del cobre es una de las actividades económicas más importantes en todo el mundo debido a la gran demanda que tiene este metal en diversos sectores industriales como la construcción, la electrónica, la energía, entre otros. En particular, en Chile la minería del cobre se vuelve especialmente relevante ya que representa una gran parte de la economía del país y lo posiciona como el principal productor y exportador mundial de cobre. En el año 2021 la producción de cobre en Chile alcanzó los 5,58 millones de toneladas, lo que representa alrededor del 26,6% de la producción mundial (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2021).

El proceso minero para obtener el cobre desde el mineral comprende distintas etapas, las cuales pueden variar dependiendo del tipo de mineral que se esté extrayendo y del método utilizado para su extracción. En Chile, se pueden encontrar dos tipos principales de minerales de cobre: sulfurados y oxidados.

Los minerales sulfurados o sulfuros de cobre son aquellos que contienen azufre (S) en su composición química. Los sulfuros de cobre más importantes son la calcosina (Cu_2S), covelina (CuS), bornita (Cu_5FeS_4) y el más abundante de todos, la calcopirita (CuFeS_2) (Domic, 2001). Por otro lado, los minerales oxidados u óxidos de cobre son aquellos que contienen oxígeno (O) en su fórmula química como elemento constitutivo principal. Los minerales oxidados de cobre más importantes de acuerdo con su abundancia y valor económico son los siguientes: malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), crisocola ($(\text{Cu}, \text{Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) y atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$).

Las tecnologías de extracción para obtener el metal valioso dependerán principalmente de la mineralogía y de las características químicas particulares de estos minerales de cobre. Por la vía de la concentración y pirometalurgia, la más común y ampliamente utilizada es la concentración por flotación, normalmente asociada al tratamiento de sulfuros de cobre. La flotación es un proceso fisicoquímico en la cual el mineral reducido en tamaño se adhiere superficialmente a burbujas, lo que determina la separación del mineral de interés.

Por otro lado, se tiene la vía hidrometalúrgica, que se selecciona para tratar óxidos de cobre y minerales mixtos (mezcla de minerales óxidos-sulfuros) del metal. La hidrometalurgia es el proceso de obtención en el cual se utiliza una solución química para disolver el cobre del mineral y recuperarlo en forma de solución. Esta sigue de manera clásica las etapas de lixiviación (LX), extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW).

En la Figura 1 se detallan estas vías de procesamiento para minerales de cobre, las cuales comprenden desde la extracción del mineral post – tronadura en la mina *in situ* hasta la obtención del producto final de cobre que será comercializado.

Dado que este trabajo se desarrolla en el contexto de un proceso hidrometalúrgico, el enfoque se pondrá en esta vía de procesamiento. La línea de procesamiento de minerales

de cobre por vía hidrometalúrgica implica la extracción del cobre contenido en los minerales a través de procesos químicos utilizando soluciones acuosas.

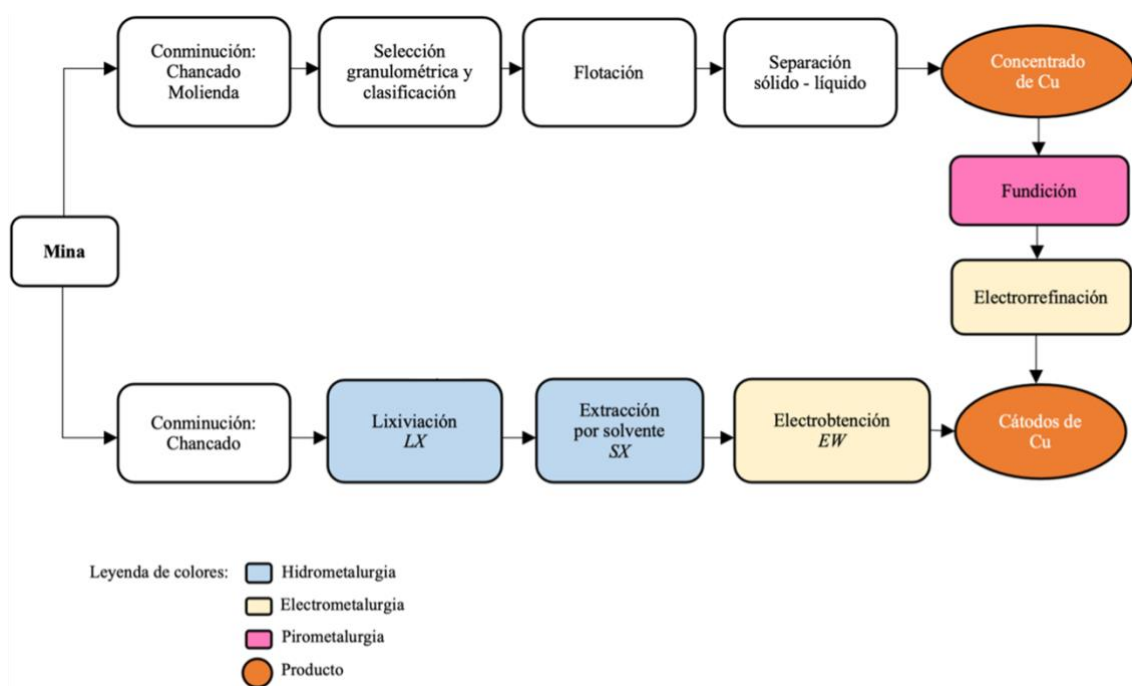


Figura 1: Etapas del proceso productivo para minerales de cobre, desde su extracción in situ hasta la obtención de producto final. Fuente: Elaboración propia (2023).

Como se observa en la Figura 1 en primer lugar, se realiza la conminución mediante chancado: en esta etapa, el mineral de cobre extraído de la mina se reduce de tamaño a través de la trituration, hasta obtener un tamaño de partícula adecuado que facilite la liberación de los minerales de cobre.

Luego sigue la etapa de Lixiviación (*Leaching*, LX): en la gran minería, generalmente el mineral chancado se dispone en grandes pilas que se rocían con una solución acuosa que contiene agentes químicos como ácido sulfúrico o una solución de cianuro, dependiendo del tipo de mineral y del proceso específico. Esta solución disuelve el cobre presente en el mineral y forma una solución rica en cobre, conocida como *Pregnant Leach Solution* (PLS, por sus siglas en inglés).

Después, entra en juego la Extracción por Solventes (*Solvent Extraction*, SX). En este proceso, se utiliza un solvente orgánico que tiene una alta afinidad por el cobre. El cobre se transfiere del PLS a la fase orgánica del solvente, formando una solución rica en cobre llamada "electrolito cargado".

Acto seguido, se lleva a cabo la Electro-obtención (*Electrowinning*, EW). La solución orgánica rica en cobre se procesa en celdas electrolíticas. En estas celdas, el cobre se electro deposita en cátodos de acero inoxidable mediante la aplicación de corriente eléctrica. Así, se obtienen cátodos de cobre de alta pureza como el producto final del proceso.

La vía hidrometalúrgica y en particular la lixiviación en pilas presenta una gran ventaja ya que es un proceso más económico y menos contaminante que la vía de

procesamiento de concentración por flotación. Sin embargo, una desventaja es que el rendimiento del proceso de lixiviación puede ser menor que en la flotación, y el mineral puede tardar más tiempo en procesarse (Domic, 2001; Ruiz, 2013).

El rendimiento de la lixiviación tiene que ver principalmente con el tipo de mineral, en general, los minerales oxidados son más fáciles de lixiviar que los minerales sulfurados debido a su composición química y permeabilidad. En contraste, los minerales sulfurados tienen enlaces más fuertes con el azufre, lo que dificulta su lixiviación. Es por esto que la lixiviación se utiliza principalmente en la extracción de cobre a partir de minerales oxidados. Sin embargo, durante los últimos años se ha fomentado fuertemente la aplicación, innovación y desarrollo tecnológico de la lixiviación para el procesamiento de minerales sulfurados de cobre (Larenas, 2013). Las razones de esta motivación serán abordadas a continuación en la siguiente sección.

2. Contexto y problemática

En la actualidad, los sulfuros de cobre son cada vez más abundantes, mientras que los óxidos de cobre, que se procesan mediante hidrometalurgia, son cada vez más escasos. La producción hidrometalúrgica está experimentando una significativa disminución. Se estima que la participación de la producción hidrometalúrgica pasará del 25,1% de la producción total en 2021 (1,41 millones de toneladas) a solo un 6,3% hacia 2033, lo que equivale a poco más de 416 mil toneladas, una caída del 70,6%. Esto resultará en el cierre de casi 14 operaciones hidrometalúrgicas, dejando operativas solo 20 plantas hacia fines del periodo de análisis. Esta variación en la proporción de tipo de mineral extraído implica una generación de capacidad ociosa significativa en las instalaciones hidrometalúrgicas, exacerbada por la falta de iniciativas públicas o privadas que busquen utilizar la capacidad instalada de alrededor de 2,2 millones de toneladas de cobre fino en estas plantas. La prolongación de la vida útil de algunas faenas de óxidos no es suficiente para contrarrestar esta tendencia, y se hace evidente la necesidad de nuevas estrategias para optimizar el uso de las instalaciones existentes (Comisión Chilena del Cobre, 2022).

En Chile, el 70% de los minerales sulfurados de cobre han sido predominantemente procesados mediante concentración por flotación seguido de fundición (Comisión Chilena del Cobre, 2017). Si bien, la concentración por flotación ha sido ampliamente utilizada, este proceso requiere un alto consumo de agua fresca y un alto consumo energético. En el caso de la fundición, debido al atraso tecnológico y la falta de innovación, esta requiere de un alto consumo energético y genera problemas ambientales debido a la generación continua de contaminantes en forma gaseosa como SO₂, As, material particulado, etc. (Corporación Alta Ley, 2019).

Por tanto, existe una preocupación a nivel mundial frente a este fenómeno, ya que si aumentan las concentradoras para procesar más minerales sulfurados, se necesitará más agua y energía para hacerlo, recursos que son limitados y cada vez más restringidos debido a la escasez hídrica, el cambio climático y el cuidado del medioambiente. A nivel de industria, además se agregan los costos a los que se debe incurrir para modernizar las instalaciones de fundición y/o construir nuevas plantas concentradoras.

Sin duda, la minería de sulfuros de cobre en crecimiento y las condiciones críticas de los métodos convencionales para su procesamiento, han llevado a la necesidad de

desarrollar métodos alternativos para procesar los sulfuros, que sean de menor impacto medioambiental, como lo es la vía hidrometalúrgica. La lixiviación en pilas es una técnica rentable y menos contaminante que la flotación, por lo que se ha convertido en una opción atractiva para el procesamiento de sulfuros de cobre (Ruiz, 2013), además de ser una técnica que logra abordar la problemática de la capacidad ociosa de instalaciones para lixiviación en pilas con el gradual agotamiento de minerales oxidados.

Sin embargo, esta opción presenta desafíos ya que los sulfuros son refractarios a la lixiviación y tienen una cinética lenta, a diferencia de los óxidos, por lo que hay que buscar nuevas tecnologías y/o metodologías que mejoren los resultados de dicho proceso. Para contribuir a esto, en el marco del proyecto Fondef ID19I10202 “Modelo fenomenológico integrado de lixiviación en pilas de sulfuros: desde la teoría a la aplicación industrial”, se ha desarrollado un modelo fenomenológico integrado, el cual busca generar un plan de riego óptimo para operaciones de lixiviación de minerales sulfurados de cobre, en función de sus condiciones fenomenológicas.

Para obtener un plan de riego óptimo, este modelo fenomenológico integra un modelo de optimización que maximiza la recuperación de metal en el riego. Sin embargo, existe una problemática en este enfoque que el modelo no resuelve, ya que solo considerar la máxima recuperación de metal puede aumentar significativamente los costos del proceso en diferentes aspectos, como los asociados a la cantidad de insumos a utilizar y los tiempos de operación. Así, un plan de riego entregado por el modelo no asegura que sea rentable para la operación, lo que trae consigo un gran riesgo para el negocio minero.

3. Justificación del trabajo

La problemática identificada en la sección anterior se convierte en una oportunidad para abordar un enfoque económico en la optimización del riego para el proceso de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre. En consecuencia, este trabajo de memoria desarrolla una valorización económica de dicho proceso hidrometalúrgico y la integra al modelo de optimización para maximizar el flujo de caja descontado de la operación. El flujo de caja descontado permite determinar el valor presente de los flujos de efectivo futuros generados por la operación, por lo tanto, se busca maximizar el flujo de caja descontado para determinar el plan de riego que maximiza las ganancias económicas durante todo el proceso.

La propuesta de integrar una valorización económica extiende el alcance del modelo de optimización y aumenta su precisión, mejorando el resultado final al considerar factores económicos clave para la rentabilidad en la aplicación del plan de riego generado.

El modelo de optimización mejorado es un aporte significativo para la industria minera, ya que entrega una herramienta innovadora para la planificación y la toma de decisiones en operaciones de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre, aumentando la eficiencia y la productividad del proceso, además de potenciar una alternativa de menor impacto medioambiental, más económica y que se encarga de la problemática actual del procesamiento de minerales sulfurados de cobre en pos de su sostenibilidad a futuro.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general del trabajo

Desarrollar una valorización económica del proceso de lixiviación en pilas para minerales sulfurados de cobre e integrarla en un modelo de optimización existente que genera planes de riego óptimos con el fin de maximizar el flujo de caja descontado de la operación a lo largo de todo el horizonte de planificación.

4.2 Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar los factores económicos relevantes para el proceso de lixiviación en pilas de minerales sulfurados de cobre.
- Generar un modelo que relacione los factores económicos relevantes identificados, mediante ecuaciones matemáticas que representen los costos e ingresos asociados al proceso.
- Integrar el modelo de valorización económica en un modelo de optimización existente que genera planes de riego óptimos.
- Evaluar la efectividad del modelo integrado a través de pruebas y análisis de los resultados obtenidos.

5. Alcances y limitaciones

El modelo de optimización y la valorización económica son específicos para el método de procesamiento de sulfuros de cobre en pilas de lixiviación. El modelo de optimización es alimentado con datos obtenidos desde un modelo fenomenológico que simula el proceso hidrometalúrgico.

La valorización económica realizada para el proceso de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre abarca desde la deposición del mineral en la pila hasta la obtención de la solución rica en cobre conocida como "PLS" (Pregnant Leach Solution). Este rango de operación se denomina "LX" en esta memoria y comprende los costos modelados asociados a dicha etapa. Es importante explicitar que los costos correspondientes a los subprocesos de extracción por solvente (SX) y electrorrefinación (EW) no se incluyen en el modelado del proceso LX, sino que se suman por separado con valores de referencia recopilados durante este estudio.

Los valores que alimentan las ecuaciones de costos, también llamados valores de entrada o "inputs", son referenciales y fueron obtenidos a través de una extensa recopilación y análisis de los valores manejados en operaciones de la industria minera. Dado lo anterior, los resultados que se obtienen en este estudio son aproximaciones representativas de la realidad en las operaciones que hacen lixiviación en pilas. Además, la valorización económica está parametrizada, por lo que permite ajustes en la precisión de sus resultados, al ingresar valores más específicos como los que se manejan en la planta de lixiviación in situ donde se utilice esta herramienta para la obtención de planes de riego optimizados.

6. Organización del trabajo

En el presente trabajo, se aborda de manera exhaustiva el tema de la valorización económica y la optimización de riego en el proceso de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre. El contenido de este trabajo está estructurado en varios capítulos que permiten una comprensión detallada y progresiva del estudio. En el Capítulo I, se introducen los antecedentes generales que motivan esta investigación, junto con el contexto y la problemática asociada. La justificación del trabajo y los objetivos que se persiguen se exponen en las secciones correspondientes. Además, se establecen los alcances y limitaciones del estudio para clarificar su enfoque.

En el Capítulo II, se revisan los antecedentes bibliográficos, en los que se aborda el marco teórico que sustenta este trabajo, centrándose en la lixiviación de minerales sulfurados de cobre y su valorización económica en pilas de lixiviación. También se analiza el estado del arte en relación con el tema.

El Capítulo III constituye el núcleo del trabajo, donde se aborda el desarrollo del objetivo principal. Se detalla la metodología empleada en este estudio, incluyendo la obtención y análisis de datos. Se presenta una valorización económica de la lixiviación en pilas de sulfuros de cobre, analizando los costos y beneficios relevantes del proceso. Luego, se explica su integración en el modelo de optimización de riego.

En el Capítulo IV se presenta el caso de estudio donde se aplica la valorización económica a través del modelo de optimización.

En el Capítulo V se presentan los resultados obtenidos con las simulaciones corridas por el modelo de optimización para cada aspecto del caso de estudio. Además, se incluye el análisis y discusión de cada uno de los resultados.

En el Capítulo VI, se presentan las conclusiones generales derivadas del estudio, resaltando los aportes realizados y las limitaciones encontradas durante la investigación. Se proporcionan recomendaciones para futuras investigaciones en el área.

II. Antecedentes

El presente capítulo constituye una revisión de la literatura relevante para el desarrollo y contextualización de este trabajo de memoria. Esta revisión está estructurada en dos secciones fundamentales: el marco teórico y el estado del arte.

El marco teórico explora la teoría clave relacionada con el estudio realizado, estableciendo sus bases conceptuales. Por otro lado, el estado del arte analiza las investigaciones más actuales sobre el desarrollo abordado en este trabajo.

1. Marco teórico

1.1 Lixiviación de minerales sulfurados de cobre

El proceso de lixiviación corresponde a la extracción química de minerales desde un sólido mediante su contacto con una solución acuosa reactiva. Para el caso del cobre, este se disuelve en solución ácida, compuesta generalmente por agua más ácido sulfúrico. Este proceso es ampliamente usado para procesar minerales oxidados de cobre y en menor medida se aplica a sulfuros de cobre.

En particular, la lixiviación de minerales sulfurados de cobre es un proceso fundamental en la obtención de cobre a partir de depósitos de baja ley, donde la concentración de este metal valioso es relativamente moderada. Los minerales sulfurados de cobre, como la calcopirita y la bornita, constituyen una parte significativa de las reservas minerales totales, y su procesamiento requiere enfoques específicos debido a su baja ley y complejidad química, que los puede hacer no viables económicamente si se procesan mediante métodos convencionales, como la flotación y la pirometalurgia.

En esta sección, se explorarán los aspectos fundamentales de la lixiviación de sulfuros de cobre de baja ley, incluyendo las reacciones químicas involucradas y los desafíos asociados a este proceso.

1.1.1 Características generales de los sulfuros de cobre

El cobre se encuentra en la corteza terrestre en forma de compuestos con azufre, oxígeno y otros elementos, lo que da lugar a una amplia variedad de sulfuros de cobre, como se puede ver en la Tabla 1. Estos sulfuros se clasifican en dos grupos: sulfuros primarios y sulfuros secundarios. Los sulfuros primarios se encuentran más profundos en la corteza terrestre, mientras que los sulfuros secundarios están ubicados por encima de los primarios y por debajo de los óxidos, que son los más cercanos a la superficie.

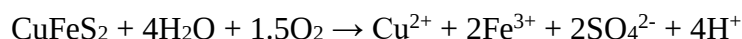
Dentro de los sulfuros primarios, la calcopirita destaca como el mineral más abundante en los yacimientos de cobre, siendo una de las fuentes más importantes de cobre a nivel mundial.

Tabla 1: Tipos de minerales sulfurados de cobre y su presencia en la corteza terrestre de Chile. Fuente: Codelco, Cochilco.

Mineral	Composición	Clasificación	Abundancia aprox. en Chile %
Calcopirita	CuFeS ₂	Primario	70%
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	Primario	5-10%
Enargita	Cu ₃ AsS ₄	Primario	1-5%
Covelina	CuS	Secundario	< 1%
Calcosina	Cu ₂ S	Secundario	< 1%
Digenita	Cu ₉ S ₅	Secundario	< 1%
Tenantita	Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃	Secundario	< 1%
Idaíta	Cu ₅ FeS ₄	Primario	< 1%

1.1.2 Reacciones químicas en la lixiviación de sulfuros de cobre

La lixiviación de sulfuros de cobre de baja ley implica el uso de soluciones ácidas o en algunos casos, soluciones biológicas, para disolver el cobre presente en los minerales sulfurados. La reacción química fundamental involucrada en la lixiviación de sulfuros de cobre es la siguiente:



En esta reacción, la calcopirita (CuFeS₂) reacciona con el oxígeno y el agua para formar iones cúpricos (Cu²⁺), iones férricos (Fe³⁺), iones sulfato (SO₄²⁻) y protones (H⁺). Estos iones disueltos son transportados a través de la solución lixiviante y pueden ser posteriormente recuperados mediante técnicas de extracción por solventes o electro-obtención para obtener cobre metálico de alta pureza.

En base a los fundamentos fisicoquímicos que intervienen en los procesos de hidrometalurgia, para que ocurran las reacciones químicas se requiere de una fuerza motriz o energía que la provoque y la velocidad de reacción está determinada por la magnitud activadora de esa fuerza. Como se mencionó anteriormente, en el caso de los minerales sulfurados, la fuerza activadora es proporcionada por la presencia y concentración en la solución de lixiviación de oxígeno disuelto o de ion férrico, que actúan como captadores de electrones (Domic, 2001).

1.1.3 Desafíos y desarrollo tecnológico en la lixiviación de sulfuros de cobre

Dada la larga historia de la minería del cobre en Chile, el procesamiento de sulfuros primarios es la principal fuente para obtener concentrados y cátodos de cobre. Sin embargo, existen desafíos en términos de eficiencia y viabilidad económica en las tecnologías utilizadas para obtener estos productos (Moncada, 2017).

La recuperación de cobre desde un mineral sulfurado primario por la vía hidrometalúrgica requiere de la disolución de las especies sulfuradas de cobre contenidas en el mineral, la que generalmente es demasiado lenta como para ser de

interés comercial, lo que se traduce en un gran desafío para el proceso (Domic, 2001), requiriendo encontrar condiciones que lo aceleren.

Otro de los principales desafíos en la lixiviación de sulfuros de cobre es la refractariedad de estos minerales. Los sulfuros primarios, como la calcopirita, son los más difíciles de lixiviar, ya que requieren condiciones más extremas de temperatura y presión para que la reacción de oxidación sea efectiva. Otro desafío es la presencia de sulfuros secundarios, como la calcosina y la covelina, que pueden competir con los sulfuros primarios por los iones lixiviantes. Esto puede reducir la eficiencia de la lixiviación y aumentar el consumo de reactivos.

Debido a esto se ha trabajado arduamente para disolver económicamente estos sulfuros primarios (o sulfuros de baja ley) mediante investigaciones con diversos medios oxidantes, donde las líneas de desarrollo tecnológico de lixiviación en medio sulfato y en medio cloruro son las de mejores resultados.

Por el lado del medio sulfato, las tecnologías se pueden subdividir según sus condiciones de operación en alta presión-temperatura, lixiviación química y lixiviación biológica, donde esta última es la de menor costo en comparación con las otras alternativas, ya que no necesita de altas presiones, temperaturas ni molienda fina (Comisión Chilena del Cobre, 2017). Dada la ventaja económica/operacional que presenta y en línea con los objetivos de este trabajo, se abordará la lixiviación biológica dentro de las metodologías de desarrollo tecnológico en medio sulfato, junto con la lixiviación en medio cloruro. A continuación, se describen dichos métodos de procesamiento para sulfuros de cobre.

Bioliixiviación

La Bioliixiviación o lixiviación bacteriana es un proceso de extracción de metales que utiliza microorganismos para oxidar los minerales. En el caso de los sulfuros de cobre, los microorganismos oxidan los sulfuros, liberando iones de cobre solubles en agua, haciendo de la lixiviación un proceso biológicamente catalizado.

La lixiviación bacteriana se ha desarrollado gracias al descubrimientos de bacterias acidófilas: microorganismos que pueden sobrevivir en condiciones ácidas, como el ambiente de la lixiviación. Estas bacterias son obtenidas principalmente desde aguas mina, tienen un tamaño del orden de 0,5 a 2 μm , se reproducen por fisión binaria y se pueden clasificar según su fuente de energía, utilización de oxígeno y temperatura del medio (Ruiz, 2013). Las bacterias acidófilas más utilizadas en la bioliixiviación de sulfuros de cobre son las “*Thiobacillus ferrooxidans*” y “*Thiobacillus thiooxidans*”.

Para que el proceso de bioliixiviación ocurra, es de vital importancia que el ambiente donde las bacterias son introducidas les permita desarrollarse. Así, las variables operacionales que regulan la vida de las bacterias incluyen (Li, Yang, Tong, & Sand, 2021)

- Temperatura: la temperatura óptima es de 30 a 35 °C.
- pH: el pH óptimo es de 1 a 2.
- Concentración de oxígeno: la concentración de oxígeno óptima es de 1 a 2 g/L.
- Concentración de sulfuros: la concentración de sulfuros óptima es de 1 a 2 g/L.

A nivel químico, en la biolixiviación de sulfuros de cobre, las bacterias oxidan los sulfuros de cobre a sulfatos de cobre solubles. Este proceso se produce en dos etapas:

- Oxidación del sulfuro de cobre: Las bacterias oxidan el sulfuro de cobre a sulfuro elemental y ácido sulfúrico. Esta reacción se produce en presencia de oxígeno y agua.
- Disolución del cobre: El ácido sulfúrico producido en la primera etapa disuelve el cobre del mineral, formando sulfato de cobre soluble.

La reacción química general para la biolixiviación de uno de los sulfuros de cobre más abundante, la calcopirita (CuFeS_2), es la siguiente:



El ácido sulfúrico producido en esta reacción puede continuar oxidando otros sulfuros de cobre presentes en el mineral, lo que aumenta la eficiencia del proceso.

La biolixiviación presenta algunas ventajas sobre los métodos tradicionales de lixiviación, entre los que podemos encontrar (Bosecker, 1997):

- Requiere poca inversión de capital (las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas)
- Costos operacionales significativamente menores debido a la reducción de los requisitos energéticos y la eliminación de reactivos químicos costosos.
- Minimiza el impacto ambiental al reducir la liberación de sustancias nocivas al medioambiente.
- Permite el tratamiento rentable de minerales de baja ley.

Sin embargo, esta tecnología también tiene los siguientes desafíos:

- Velocidad de lixiviación lenta: La biolixiviación es un proceso relativamente lento, por lo que se requiere un tiempo prolongado para completar la lixiviación.
- Sensibilidad a factores ambientales: La biolixiviación puede ser sensible a factores ambientales, como la temperatura, el pH y la concentración de oxígeno, ya que el proceso debe mantener equilibrios delicados para mantener vivos y en condiciones óptimas a los microorganismos.

A pesar de lo anterior, la biolixiviación se presenta como una tecnología sostenible, limpia y de bajo costo. Además, los avances en investigación y desarrollo están mejorando la eficiencia de la biolixiviación, lo que la hace una tecnología más viable para el tratamiento de estos minerales.

Lixiviación medio cloruro

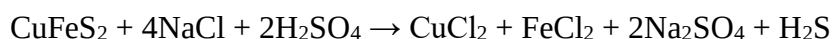
La lixiviación en medio cloruro o lixiviación clorurada se ha convertido en un enfoque destacado en la industria minera para el procesamiento de sulfuros de cobre de baja ley. Este método utiliza una solución de cloruro de sodio (NaCl) o potasio (KCl) como lixiviante, y su eficacia radica en la capacidad del ion cloruro (Cl^-) para actuar como un oxidante más potente que el ácido sulfúrico, permitiendo reacciones de oxidación a

temperaturas y presiones más bajas. Además, este proceso presenta avances tanto en la lixiviación de sulfuros secundarios como en la lixiviación de sulfuros primarios.

A nivel químico, la lixiviación clorurada ocurre en dos etapas:

- Oxidación del sulfuro de cobre: el cloruro de sodio y el ácido sulfúrico presentes en la solución lixivante oxidan el sulfuro de cobre a sulfato de cobre soluble y sulfuro elemental. Esta reacción es catalizada por la presencia de oxígeno.
- Disolución del cobre: el sulfato de cobre soluble formado en la primera etapa se disuelve en la solución lixivante, dando lugar a una solución rica en cobre.

Así, la reacción química global de la lixiviación en medio cloruro, en el caso de la calcopirita (CuFeS_2), se presenta como:



La lixiviación en medio cloruro presenta una serie de ventajas significativas sobre otros procesos de lixiviación de sulfuros primarios de cobre, como la biolixiviación o la lixiviación en medio sulfato, principalmente (Ipinza, 2013):

- Mayor eficiencia de recuperación: la lixiviación en medio cloruro puede alcanzar recuperaciones de cobre superiores al 80%.
- Mejor cinética de disolución (a presión y temperatura ambiente): la presencia de cloruro acelera la reacción de oxidación. En medio cloruro - ácido sulfúrico la velocidad de disolución del cobre puede incrementarse de 3 a 5 veces la velocidad en medio sulfato.

Además (Ibáñez & Velásquez, 2013) :

- Permite la utilización directa de agua de mar.
- Capacidad de regenerar los agentes lixivantes a través de la electrólisis.
- Reducción del impacto ambiental al generar menos residuos.

No obstante, persisten desafíos en términos de costos de capital y operativos. Específicamente la lixiviación en medio cloruro enfrenta los siguientes problemas (Comisión Chilena del Cobre, 2017):

- Costos operativos elevados.
- Corrosión excesiva de los materiales utilizados comúnmente en los circuitos de LX-SX-EW por la presencia de cloro. Esto genera problemas en etapas posteriores a la lixiviación por los residuos de ion cloruro, produciendo cátodos de menor calidad que podrían requerir una etapa adicional de electro-refinación.

A pesar de lo anterior, se espera que la investigación y el desarrollo continuos reduzcan estos costos en el futuro.

En Chile, la lixiviación en medio cloruro se está adoptando rápidamente en la industria minera, especialmente para procesar minerales sulfurosos de baja ley. Algunas de las

empresas líderes que han implementado esta tecnología incluyen Codelco, Antofagasta Minerals, BHP, Collahuasi, entre otras. Según (Centro Nacional de Pilotaje, UC y UTFSM, 2021) se prevé que esta tendencia se mantenga y se masifique a partir de 2024.

En resumen, la lixiviación en medio cloruro representa una innovación significativa en la industria minera de cobre en Chile y se vislumbra como una ruta valiosa para la disolución de sulfuros de cobre primarios, especialmente los de baja ley. Con el tiempo, se anticipa que esta tecnología se extenderá y contribuirá a la sostenibilidad y eficiencia de la industria minera chilena.

1.2 Lixiviación en pilas

La lixiviación en pilas es el método más importante de extracción hidrometalúrgica de cobre (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2011). Consiste en la acumulación de mineral chancado, el cual es acopiado de forma mecanizada en terraplenes de gran extensión, formando “montones” o pilas que son regadas sistemáticamente con solución lixivante, forzando que la lixiviación ocurra al interior de la estructura. Esta técnica se utiliza principalmente en la extracción de minerales de roca con baja ley (0.3 % - 0.7 %) debido a su relativo bajo costo y consumo energético (López, 2012; Cai, 2016; Petersen, 2016; Ghorbani, Franzidis, & Petersen, 2016).



Figura 2: Vista aérea de una pila de lixiviación. Fuente: AG Solutions

Las pilas se construyen con material chancado y apilado, sobre un terreno previamente impermeabilizado, formando terraplenes que pueden alcanzar alturas de 5 a 15 metros (Figura 2). Estos terraplenes pueden construirse sobre un sistema de drenaje preparado en el terreno o sobre terraplenes ya lixiviados, lo que permite obtener pilas con alturas de cientos de metros.

Sobre el material apilado se instala una malla de riego que se extiende por toda la superficie de la pila, la cual es regada con una solución lixivante compuesta por ácido sulfúrico, agua y reactivos, aplicada a tasas que oscilan entre 5 y 30 L/h/m², mediante el uso de sistemas de aspersores o de goteo. La composición de la solución utilizada para el riego varía a lo largo del tiempo según el mineral que se esté lixiviando, las características de la roca y las particularidades de cada operación minera.

A medida que la solución percola a través de la pila, disuelve el cobre presente en el mineral, formando una solución rica en Cu²⁺ (*PLS*). Esta solución impregnada o enriquecida *PLS* se recoleta en la base de la pila y se transporta a piscinas o estanques de recolección. En algunos casos, el *PLS* puede ser recirculado a través de la pila varias veces para aumentar la eficiencia de la extracción.

En la base de la pila, existe un sistema de recolección construido con material grueso de alta permeabilidad, en el que se instalan tuberías perforadas para recolectar el *PLS* y transportarlo hacia las piscinas de almacenamiento. El diseño del sistema de recolección asegura que las tuberías tengan suficiente pendiente para permitir el flujo gravitacional de la solución recolectada. Además, se utilizan geomembranas de plástico, como polietileno de alta densidad (*HDPE*), para proteger el sustrato impermeable y evitar la filtración de soluciones lixiviadas al suelo.

El *PLS* de las piscinas, obtenido por la lixiviación, será posteriormente sometido a un proceso de purificación de extracción por solvente *SX*, donde se libera de impurezas mediante extracción iónica. Finalmente, la solución purificada se lleva a un proceso de recuperación electrometalúrgico llamado electro-obtención *EW* donde se recupera el cobre desde la solución electrolito para producir cátodos de cobre de alta pureza (99,99 %).

La lixiviación en pilas ofrece diversas ventajas, como un bajo costo de inversión y operación, alta recuperación desde minerales oxidados y significativas recuperaciones de cobre desde minerales sulfurados. Además, es importante recordar que como se vio en la sección 1.1, el proceso de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre es más complejo que la lixiviación en pilas de óxidos de cobre, debido a que los sulfuros de cobre son menos solubles en ácido que los óxidos. Los sulfuros de cobre requieren de una oxidación previa antes de poder ser lixiviados. Esto se logra mediante la adición de bacterias o químicos oxidantes a la solución de lixiviación, lo que aumenta la tasa de disolución de los sulfuros.

1.2.1 Configuración de pilas de lixiviación

La lixiviación en pilas ofrece diversas alternativas para su ejecución, y la selección entre estas opciones está fundamentada en análisis económicos y la viabilidad del terreno. En general, las pilas de lixiviación pueden ser clasificadas en pilas estáticas o dinámicas, según su construcción y forma de operar.

Las pilas estáticas, también llamadas *multilift* o de múltiples etapas, se componen de una etapa inicial construida sobre una superficie impermeable y posteriormente se añaden etapas adicionales sobre la primera después de su lixiviación. Así, el material lixiviable se acumula permanentemente en pilas, pudiendo tener terraplenes sucesivos contruidos uno encima del otro.

En este tipo de pilas, el sistema de recuperación de soluciones puede ubicarse tanto en el fondo de la estructura como en alturas intermedias, lo que permite regar los bloques de material acumulado en diferentes etapas de su operación. Un ejemplo de este tipo de estructura se muestra en la Figura 3.

Por otro lado, las pilas dinámicas, también conocidas como *on/off*, consisten en una sola etapa de carga y descarga. El material lixiviable se deposita y riega en la pila por un tiempo limitado y luego se desecha en un botadero de ripios, siendo reemplazado con una nueva carga de mineral fresco. Estas pilas se construyen típicamente con roca chancada y aglomerada, formando un terraplén de baja altura sobre el sistema de recolección (Codelco, 2019). Un ejemplo de este tipo de estructura se muestra en la Figura 4.

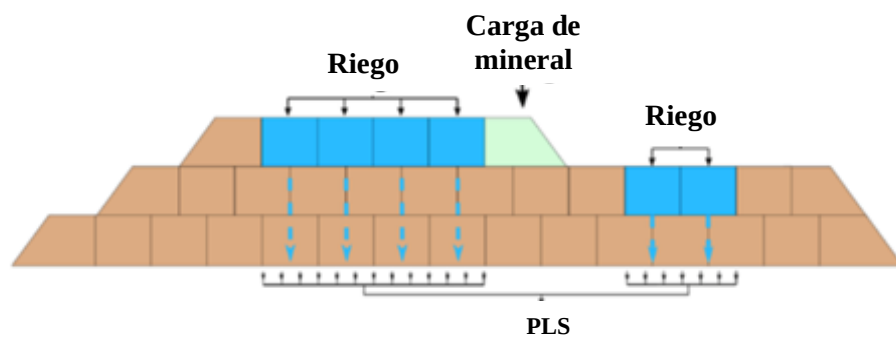


Figura 3: Pila de lixiviación estática discretizada en módulos y con riego, carga de material y zonas de recolección de solución enriquecida.

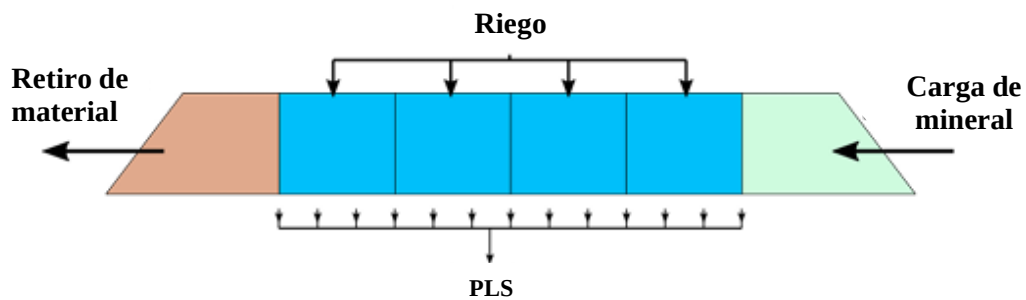


Figura 4: Esquema de pila dinámica de lixiviación (on/off).

1.2.2 Insumos y variables operativas en la Lixiviación en pilas

Para que el proceso de lixiviación en pilas se lleve a cabo y sea eficiente, es necesario considerar una serie de insumos y condiciones de operación, los que se detallan a continuación.

Insumos

Los insumos son los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo la lixiviación en pilas. Para el caso de los minerales de cobre, estos son (Domic, 2001; Codelco, s.f.; Petersen, 2016; Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2011):

- **Mineral triturado:** previo a la lixiviación, el mineral objetivo se tritura, pasando por chancado, para aumentar su área superficial y facilitar el contacto con la solución lixiviante. Así, se acopia en forma de pila para comenzar con el proceso, como se observa en la Figura 5.
- **Solución lixiviante:** es empleada para disolver el metal presente en el mineral. La composición de esta solución varía según el tipo de mineral, el contenido metálico, la solubilidad del metal y la corrosión de los equipos. En la lixiviación de minerales de cobre en pilas, se utiliza comúnmente una solución acuosa de ácido sulfúrico, con una concentración de 5-10%. El ácido sulfúrico actúa como agente oxidante, reaccionando con los minerales de cobre para formar sulfato de cobre soluble. Además del ácido sulfúrico, esta solución puede incorporar aditivos como oxidantes, reductores, agentes complejantes o inhibidores de corrosión, que se emplean para mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación o proteger los equipos.



Figura 5: Formación de una pila de lixiviación con mineral de cobre previamente chancado. A la izquierda el material es acopiado por camiones. A la derecha el material se acopia por correa transportadora. Fuente: Alan J. Breitenbach SME.

- **Agua:** se usa para mezclar con la solución lixiviante y para el riego de las pilas de mineral, promoviendo la circulación y la disolución del cobre.
- **Aireación:** este aspecto cobra importancia al emplear la lixiviación en minerales sulfurados de cobre. La aireación se logra al introducir aire u oxígeno directamente en la pila de mineral o en la solución lixiviante. Esto se lleva a cabo mediante sistemas de riego con aireación, donde se añade aire a la solución antes de rociarla sobre la pila, o mediante sistemas de ventilación forzada. En el segundo método, el aire se inyecta en la base de la pila, como se muestra en la Figura 6, lo que permite que ascienda y entre en contacto con el mineral y la solución lixiviante. La aireación optimiza el proceso al facilitar la disolución del cobre presente en minerales de sulfuro, incrementando la recuperación del metal. La elección del método específico depende de las condiciones y metas del proceso.

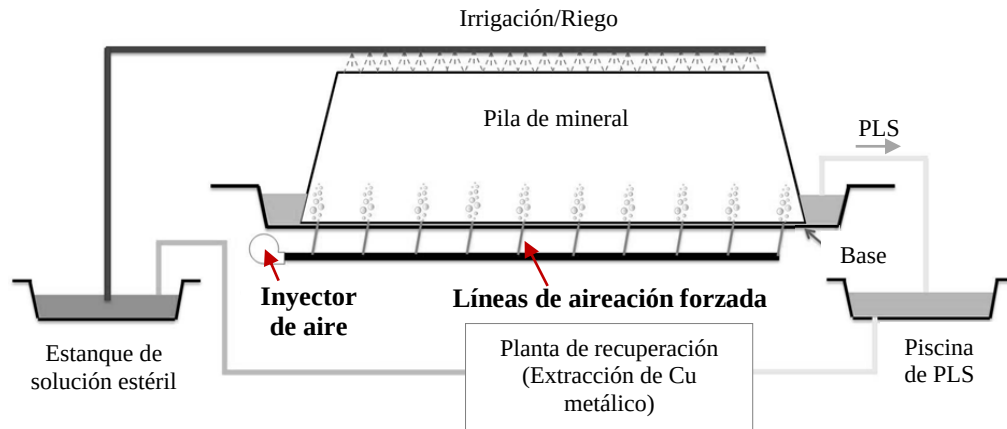


Figura 6: Esquema de un circuito típico de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre. Fuente: Petersen (2015).

- **Energía:** la energía es necesaria para operar equipos y bombas que mueven la solución lixivante y realizan otras tareas relacionadas con el proceso. Puede ser eléctrica, generada localmente o proporcionada desde fuentes externas, dependiendo de la ubicación de la operación minera.
- **Pilas de lixiviación:** estructuras diseñadas para contener el mineral y permitir el flujo eficiente del lixivante. Requieren buena permeabilidad. La pila se deposita sobre una base revestida con material impermeable, generalmente geomembranas de polietileno de alta densidad (*HDPE*, por sus siglas en inglés *High-Density Polyethylene*), para prevenir la infiltración de la solución en el terreno. Una pila se muestra en la Figura 7.



Figura 7: Pila de lixiviación instalada sobre carpeta de geomembrana. Fuente: Agua Royal Spring.

- **Sistema de control y monitoreo:** se utiliza para supervisar y controlar los parámetros del proceso, como la temperatura, el pH y la concentración de la solución lixivante. Un ejemplo de un sistema de monitoreo y control se puede observar en la Figura 8.



Figura 8: Válvula de control hidráulico instalado en el sistema de riego de una pila de lixiviación, que obtiene datos del flujo de solución lixivante. Fuente: BANFF S.A.

- **Sistema de riego:** se encarga de aplicar la solución lixivante de manera uniforme sobre la pila de mineral, ya sea por medio de un sistema de cañerías de irrigación por goteo dispuestas en malla (Véase Figura 9) o por medio de aspersores tipo *wobblers* o *sprinklers*.



Figura 9: Sistema de riego sobre una pila de mineral. Fuente: BANFF S.A.

- **Sistema de drenaje:** se ocupa de recolectar la solución enriquecida o PLS que ha pasado a través de la pila, preparándola para su posterior procesamiento (Véase Figura 10)



Figura 10: Sistema de drenaje en la base de una pila de lixiviación para recolectar PLS. Fuente: ReliXwater.

Los insumos se combinan en proporciones variables, considerando las características del mineral, los objetivos de lixiviación y las condiciones operativas específicas. Estos trabajan en conjunto para permitir la disolución del cobre del mineral y su posterior recuperación en forma de solución de sulfato de cobre, que luego se procesa para obtener cobre metálico. La gestión adecuada de estos insumos es esencial para garantizar la eficiencia y la sostenibilidad del proceso de lixiviación en pilas.

Variables Operativas

Son los parámetros que se pueden ajustar para controlar el proceso de lixiviación y optimizar la recuperación de metal. Las variables operativas en la lixiviación en pilas abarcan:

- **Distribución granulométrica:** se refiere a la variedad de tamaños de las partículas en la pila de mineral. El tamaño de las partículas del mineral tiene un efecto significativo en la velocidad y eficiencia de la lixiviación. Las partículas más finas tienen una mayor superficie específica, lo que permite que la solución lixivante entre en contacto con más mineral. Esto significa que las partículas más finas se lixiviarán más rápidamente que las partículas más gruesas. Sin embargo, las partículas demasiado finas pueden obstruir los canales de riego, lo que puede reducir la eficiencia del proceso de lixiviación. Se recomienda una distribución uniforme con partículas de 0,1 a 0,5 mm para asegurar un contacto homogéneo con la solución y prevenir obstrucciones.
- **Permeabilidad:** La permeabilidad de la pila es la capacidad de ésta para permitir el flujo del lixivante. Una pila con buena permeabilidad permitirá que el lixivante llegue a todas las partículas de mineral, lo que dará como resultado una mayor recuperación de metal. La permeabilidad se controla mediante la selección y disposición adecuada de materiales granulares, como gravilla, en su interior, lo que permite un flujo controlado de la solución lixivante a través del mineral.
- **Altura de la pila:** La altura de la pila es un parámetro operativo crítico en la lixiviación en pilas. Afecta el tiempo de residencia del lixivante, la

permeabilidad de la pila y el riesgo de canalizaciones. Una pila más alta tiene un tiempo de residencia más prolongado, lo que puede aumentar la recuperación de metal. Sin embargo, una pila demasiado alta puede disminuir la permeabilidad y causar problemas de canalizaciones. En términos prácticos, se recomienda mantener la altura de la pila en un rango de 5 a 8 metros. Este rango proporciona un equilibrio adecuado entre el tiempo de residencia y la permeabilidad.

- **Tasa de Riego:** La tasa de riego se define como la cantidad de solución lixivante aplicada a la pila de mineral por unidad de tiempo, comúnmente medida en litros por metro cuadrado por hora [L/m²/h]. Esta tasa es un parámetro crítico que influye directamente en la velocidad de las reacciones químicas, lo cual es esencial para alcanzar concentraciones deseadas de metales y otros elementos en la solución rica en cobre (PLS). Los valores típicos del flujo de lixivante en la industria suelen oscilar entre 5 y 30 [L/m²/h], dependiendo de factores como el tamaño de partícula del mineral y la altura de la pila (Ghorbani, Franzidis, & Petersen, 2016; Chking, 2021). Una tasa de riego cuidadosamente ajustada es fundamental para evitar la dilución de la solución rica y maximizar la eficiencia en la recuperación de metal. Si la tasa es demasiado baja, se corre el riesgo de obtener una recuperación insuficiente de metal, ya que las reacciones químicas tendrían un tiempo limitado para ocurrir. En contraposición, una tasa excesivamente alta podría inducir problemas como canalizaciones y arrastre de material no objetivo, disminuyendo así la eficiencia (Chking, 2021) del proceso. La fórmula para la tasa de riego generalmente se expresa como:

$$\text{Tasa de Riego} = \text{TR} = \frac{\text{Volumen de Lixivante}}{\text{Área de la Pila} \times \text{Tiempo}}$$

Donde:

- *Tasa de Riego* se mide en [L/m²/h]
- *Volumen de lixivante* es el volumen total de la solución lixivante aplicada en [L].
- *Área de la Pila* representa el área superficial sobre la cual se aplica el lixivante en [m²]
- *Tiempo* es el periodo durante el cual se aplica el lixivante en horas [h].

- **Tiempo de Lixiviación:** es un parámetro crítico que dicta la eficiencia en la recuperación de metales como el cobre. Se refiere al periodo durante el cual la solución lixivante está en contacto directo con la mena mineral. La cinética de las reacciones químicas involucradas establece este tiempo óptimo, con el objetivo de maximizar la recuperación del metal y minimizar el uso de reactivos de manera económicamente viable. Un tiempo de lixiviación insuficiente puede comprometer la recuperación de metal, resultando en pérdidas económicas. Por otro lado, un tiempo excesivamente prolongado, aunque podría mejorar la recuperación del metal, incrementa los costos operativos, haciéndolo menos viable económicamente. En la industria, los tiempos de lixiviación pueden variar considerablemente dependiendo de la mineralogía de la mena. Para óxidos de cobre, se pueden lograr extracciones superiores al 90% en tan solo 30 días. En el

caso de sulfuros, la variabilidad es aún mayor y está fuertemente influenciada por factores como la granulometría y la composición específica del mineral. Los sulfuros secundarios, como la calcosina y la covelina, requieren meses de lixiviación en pilas, y la calcopirita necesitaría años de lixiviación en botaderos (Ghorbani, Franzidis, & Petersen, 2016).

- **Concentración de Ácido:** La concentración de ácido en la solución lixivante es un factor crucial para determinar tanto la eficiencia como la economía del proceso de lixiviación en pilas. Esta concentración influye directamente en la velocidad de disolución del cobre. Una alta concentración acelera la lixiviación, aumentando la recuperación del metal; sin embargo, también tiene sus desventajas, como el mayor consumo de ácido y la corrosión potencial de los equipos de manejo. Por otro lado, concentraciones ácidas bajas o insuficientes, limitan la recuperación de cobre y pueden prolongar innecesariamente el tiempo del proceso. La optimización de esta variable es esencial, especialmente porque el ácido suele ser el reactivo de mayor costo en la lixiviación. Además, se debe buscar un equilibrio en la concentración para maximizar la recuperación y a la vez evitar el consumo excesivo de ácido en la reacción con la ganga. En la industria, esta concentración se ajusta según las características específicas del mineral y las condiciones operativas, buscando un equilibrio entre eficiencia y costos. Cada mineral y operación tiene su propia "concentración óptima", aunque los valores pueden variar ampliamente.

Los valores óptimos de estas variables varían de un mineral a otro. En general, estos valores óptimos se determinan mediante pruebas y ensayos de laboratorio con muestras del mineral a lixiviar.

En resumen, los aspectos operativos e insumos necesarios en procesos de lixiviación en pilas son esenciales para garantizar la eficiencia y la rentabilidad del proceso. La optimización de estos aspectos puede conducir a mejoras significativas en la recuperación de metal y la reducción de los costos de operación.

1.3 Valorización económica en pilas de lixiviación

La valorización económica en los procesos de lixiviación en pilas es un tema de interés crítico para la industria minera, dada su influencia directa en la viabilidad financiera de proyectos de extracción de metales. A medida que la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental ganan protagonismo, es esencial que las y los ingenieros y profesionales del sector entiendan los fundamentos económicos que subyacen en estos procesos. En el contexto de este trabajo, la valorización económica se refiere a la evaluación cuantitativa del valor monetario de un proyecto. Esta evaluación implica tanto la estimación de los ingresos generados por la venta de los metales extraídos como de los costos vinculados a la operación.

Existen diferentes metodologías para llevar a cabo una valorización económica, las cuales se fundamentan en la estimación precisa de costos e ingresos y ofrecen un análisis financiero detallado que respalda la toma de decisiones informadas. Así entre los principales se encuentra el método FCD, abordado en la sección 1.3.1 y los modelos de simulación. Este último es una herramienta que simula el comportamiento del sistema minero bajo distintos escenarios y condiciones operativas. En el caso de la

lixiviación en pilas, estos modelos evalúan el desempeño del proceso mediante la resolución de ecuaciones que representan los fenómenos físicos y químicos en la pila de lixiviación.

1.3.1 Flujo de caja descontado (FCD)

El flujo de caja descontado (FCD) se refiere al valor presente de un flujo de efectivo futuro, calculado utilizando una tasa de descuento que refleja el costo de oportunidad del capital y el riesgo asociado. Es un valor individual que representa cuánto valen hoy los flujos de efectivo futuros de una inversión o proyecto, después de haber sido descontados por una tasa apropiada.

$$FCD(t) = \frac{FC(t)}{(1 + k)^t}$$

Donde:

- $FCD(t)$ es el flujo de caja descontado a valor presente en el tiempo t ,
- $FC(t)$ es el flujo de caja neto en el tiempo t ,
- k es la tasa de descuento,
- t es el período de tiempo.

A su vez, el flujo de caja FC es el movimiento neto de dinero durante un período específico t y se define como:

$$FC(t) = \text{Ingresos del periodo } t - \text{Costos del periodo } t$$

El análisis de flujos de caja descontados es una herramienta financiera ampliamente utilizada que ayuda a estimar el valor presente de futuros flujos de efectivo, permitiendo a los inversores y gestores tomar decisiones informadas sobre inversiones y proyectos.

Por otro lado, el flujo descontado acumulado se refiere a la suma acumulativa de los FCD a lo largo del tiempo. Es una forma de representar cómo se acumulan los valores presentes de los FCD individuales a lo largo del período de análisis. Este valor puede ser útil para entender cómo se va acumulando el valor de la inversión con el tiempo.

1.3.2 Factores Económicos Críticos en Proyectos de Lixiviación en Pilas de Sulfuros de Cobre

La valorización económica de un proyecto de lixiviación en pilas en el contexto minero implica un análisis de múltiples variables. Entre estos, los costos asociados y los ingresos potenciales son de particular importancia para determinar la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

Costos asociados

Los costos asociados a la operación de lixiviación son denominados costos operativos (OpEx) y pueden ser bastante variados y complejos:

- **Consumibles:** Esto incluye reactivos químicos como ácidos y otros solventes que son vitales para el proceso de lixiviación.
- **Energía:** Los costos de energía pueden ser significativos, especialmente si el proyecto requiere bombeo continuo de soluciones o procesos de trituración previos.
- **Mano de Obra:** Incluye salarios, beneficios y capacitación para el personal que estará operando la planta.
- **Mantenimiento y Reparaciones:** Regularmente se necesitarán mantenimientos preventivos y correctivos para las máquinas y el equipo utilizado en la planta.
- **Costos Ambientales y de Cumplimiento:** Cumplir con las regulaciones ambientales y de seguridad puede requerir tratamientos de aguas residuales, sistemas de manejo de residuos y otras medidas que incurren en costos adicionales.
- **Logística y Transporte:** El movimiento de materiales dentro y fuera del sitio también puede sumar significativamente a los costos operativos.
- **Depreciación y Amortización:** Los equipos e infraestructura tendrán un ciclo de vida y se deben considerar sus costos de depreciación.

Los costos operativos pueden fluctuar según varios elementos, como la ubicación geográfica del proyecto y las regulaciones ambientales y de seguridad laboral.

Ingresos y rentabilidad en un contexto minero

- **Precio del metal:** En el caso de la lixiviación de sulfuros de cobre, el precio internacional del cobre es un determinante crítico de los ingresos potenciales. Este precio puede fluctuar significativamente en función de la oferta y la demanda en el mercado global, impactando directamente el flujo de caja del proyecto.
- **Ley del mineral:** Minerales de alta ley generalmente resultan en costos de procesamiento más bajos por unidad de metal recuperado, lo que mejora la rentabilidad.
- **Recuperación de metal:** La eficiencia en la extracción del metal a partir del mineral es crucial. Ineficiencias en este proceso pueden significar que se está dejando valor en la pila de lixiviación.
- **Gestión de riesgos y coberturas:** Dado que los precios de los metales pueden fluctuar, algunas empresas mineras optan por instrumentos financieros para mitigar el impacto de la variabilidad en los precios.

En resumen, la planificación y análisis financieros en proyectos mineros de lixiviación en pilas son complejos y requieren considerar una gama amplia de factores tanto de costos como de ingresos para asegurar la viabilidad económica a largo plazo del proyecto.

1.4 Optimización de riego en pilas de lixiviación

El riego en la lixiviación en pilas es fundamental para garantizar la eficiencia del proceso de extracción de metales. Mediante el riego, la solución lixivante entra en contacto con el mineral, facilitando la disolución de los metales valiosos. Factores como la uniformidad, frecuencia y concentración de esta solución influyen significativamente en la tasa y el grado de recuperación de los metales. Aquí, el plan de riego se vuelve crucial.

Un plan de riego es un esquema detallado que especifica la cantidad, frecuencia, y concentración de la solución lixivante que debe ser aplicada a la pila durante el proceso de lixiviación, garantizando que el mineral se sature adecuadamente para maximizar la recuperación de los metales valiosos, por lo tanto, un diseño correcto de este plan asegura que el mineral reciba la cantidad óptima de solución lixivante, en los momentos correctos y con la concentración adecuada. Esto no solo optimiza la recuperación de metales, sino que también minimiza el consumo de recursos (como agua y reactivos) y reduce los impactos ambientales potenciales, como la formación de drenajes ácidos.

En la industria, el plan de riego se genera a partir de modelos empíricos basados en datos históricos, observaciones en terreno y la experiencia operativa. Además, se consideran factores como la composición del mineral, las condiciones climáticas, la infraestructura disponible y los objetivos específicos de producción para generarlos.

Con el propósito de avanzar en tecnologías que perfeccionen la elaboración de planes de riego para la lixiviación en pilas, nace el proyecto Fondef ID19I10202. Este proyecto propone un modelo fenomenológico integrado para lixiviación en pilas de sulfuros de cobre. Su objetivo es predecir el comportamiento de las pilas en la lixiviación y, a partir de ello, proponer un plan de riego optimizado, basado en la interacción de dos modelos complementarios. El trabajo de memoria que se presenta en este documento forma parte de dicho proyecto y, por ende, sus fundamentos se detallan a continuación como marco teórico para este estudio.

1.4.1 Modelo integrado: una visión general

El proceso de lixiviación, particularmente en pilas de sulfuros de cobre, tiene un alto grado de complejidad. La necesidad de hacer predicciones precisas para la producción ha llevado al desarrollo del modelo fenomenológico integrado. Este modelo, a diferencia de sus contrapartes empíricas o puramente fenomenológicas, combina enfoques para brindar una herramienta robusta que pueda predecir la producción y, al mismo tiempo, servir como base para la optimización de las operaciones (Estay, 2022).

El modelo integrado propuesto fusiona conceptos fenomenológicos y modelos matemáticos multidisciplinarios, ofreciendo una perspectiva holística y transdisciplinaria. Su esencia radica en combinar un balance de masas dinámico de la pila de lixiviación, con cinéticas de reacción a escala de partícula (modelo fenomenológico), y un modelo de optimización. La acción de estos modelos se resume a continuación:

Modelación fenomenológica:

- Basada en la física y química de la lixiviación.
- Describe el comportamiento interno de la pila y las reacciones a nivel de partícula.
- Se soporta en pruebas específicas para determinar parámetros relacionados con la mineralogía de la pila.
- Considera múltiples factores como transporte de soluciones, calor, cinética, oxidación y precipitación.

Modelo de optimización:

- Interactúa con la parte fenomenológica.
- Evalúa diferentes escenarios para maximizar la recuperación del metal.
- Responde a cómo regar óptimamente una pila considerando las restricciones operativas y de diseño.

La interacción entre el modelo fenomenológico y el modelo de optimización se desarrolla a través de una colaboración estrecha y bidireccional. Inicialmente, en la Etapa 1, el modelo fenomenológico se dedica a describir y comprender los procesos físicos y químicos que ocurren durante la lixiviación. A partir de una representación discretizada de una pila de lixiviación en módulos, el modelo genera curvas de recuperación de cobre. Luego, estas curvas, junto con ciertas consideraciones operacionales, alimentan a la Etapa 2, donde el modelo de optimización toma protagonismo. Así, con la información provista por el modelo fenomenológico, el modelo de optimización determina la mejor estrategia operacional, ya sea para maximizar la recuperación de metal o para minimizar el consumo de reactivos, respetando las restricciones y parámetros establecidos por el modelo fenomenológico. Esta interacción se esquematiza en la Figura 11.

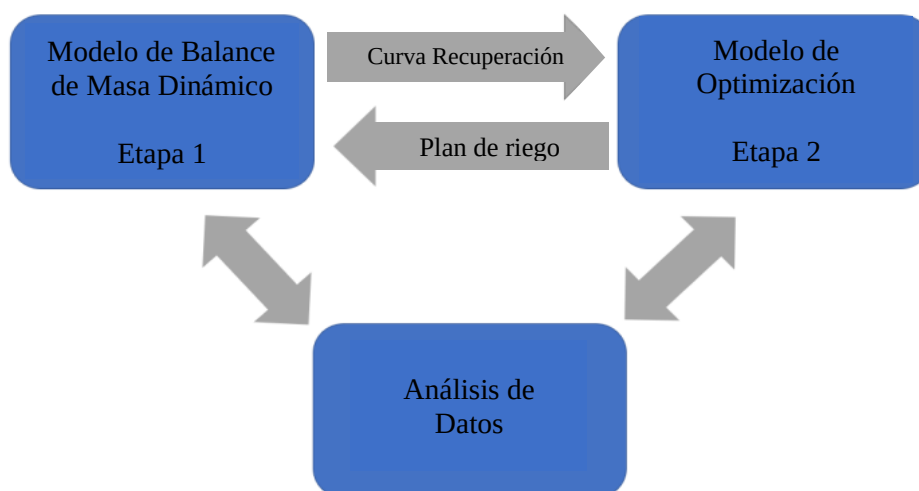


Figura 11: Interacción bidireccional entre el modelo de balance de masa dinámico y el modelo de optimización en la lixiviación de cobre.

En la práctica, este enfoque ha demostrado coherencia con los datos presentes en la literatura al simular la lixiviación en pilas en 3D. Al combinar la descripción minuciosa de los procesos a través del modelo fenomenológico con las técnicas avanzadas de toma

de decisiones del modelo de optimización, esta metodología no solo ofrece un soporte robusto y una extensibilidad funcional, sino también la capacidad de orientar decisiones operativas y optimizar operaciones a escalas realistas.

1.4.2 Modelo Fenomenológico

El modelo fenomenológico ofrece una representación detallada del proceso de lixiviación en pilas. Este proceso comprende diversas reacciones químicas y físicas que ocurren simultáneamente y que, influenciadas por factores como el tiempo, la posición y las condiciones hidráulicas, determinan la eficacia con la que se extraen los minerales deseados. El objetivo principal del modelo fenomenológico es predecir las curvas de recuperación de cobre y el consumo neto de ácido en función de las condiciones iniciales y las tasas de riego de un caso inicial de lixiviación en pilas, denominado caso E_0 , determinado según referencias de la industria.

Este modelo tiene como principales variables la solución de lixiviación, la concentración acuosa de cobre, la concentración de ácido, el cobre sólido, y la ganga. Estas variables interactúan y se ven afectadas por fenómenos como la advección (transporte de solución a través de la pila), la acumulación y las reacciones químicas. Con el fin de simplificar la complejidad del proceso y construir un modelo eficaz, se hicieron ciertos supuestos:

- Se omite el balance de energía, asumiendo condiciones isotérmicas.
- Se considera principalmente un flujo de solución vertical (1D) para los balances de masa, ignorando flujos laterales.
- Las relaciones hidráulicas se determinan por flujos en medios no saturados.
- El flujo lateral se desprecia frente al flujo vertical.

Luego, se construyeron ecuaciones y relaciones representativas del fenómeno de estudio. Así, a nivel matemático, el modelo se describe mediante leyes de conservación de masa y energía, formuladas en términos de ecuaciones en derivadas parciales (EDP). Estas EDP, al ser integradas en tiempo y espacio, se convierten en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) que representan comportamientos específicos del proceso.

A nivel conceptual, se consideró un modelo de niveles múltiples, el cual se desarrolló en base a la discretización de una pila en módulos, considerando un módulo como la unidad. De esta forma, para simular la construcción y condiciones de riego de una pila, los módulos se van apilando unos sobre otros siguiendo un plan de riego determinado. Para representar una pila de lixiviación completa, se aplica la misma estrategia, ya que no hay flujo lateral; por lo tanto, el modelo de módulo de múltiples niveles se ejecuta de manera secuencial, como se muestra en la Figura 12.

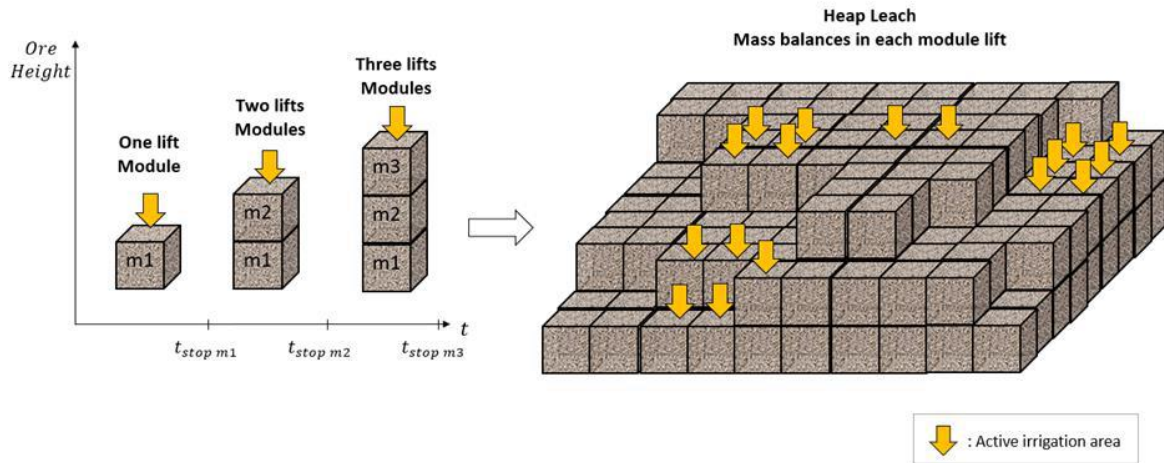


Figura 12: Diagrama de la pila de lixiviación múltiple y de la pila de lixiviación completa.

Finalmente, los resultados u *output* de este modelo, como se mencionó anteriormente, corresponden a curvas de recuperación de cobre y consumo neto de ácido, las que se pueden observar en la Figura 13.

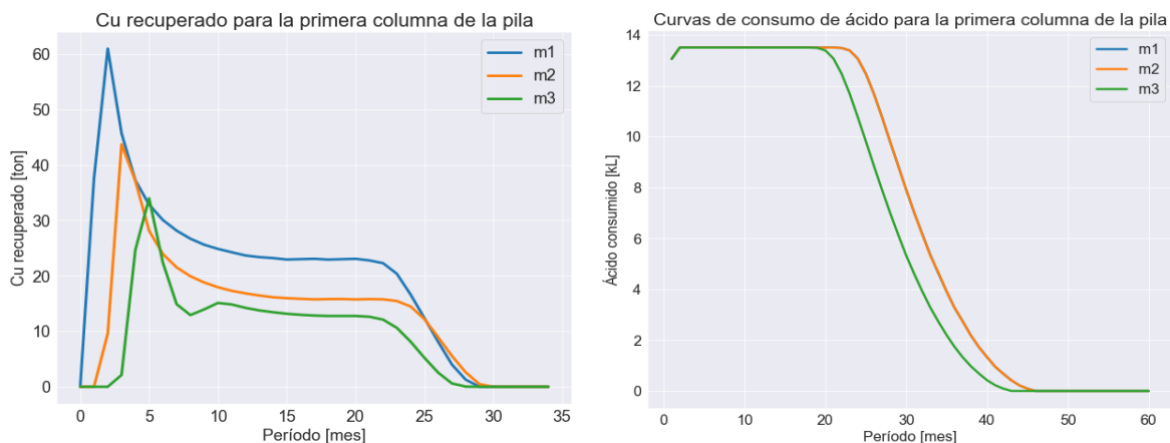


Figura 13: Principales resultados de la etapa 1. Recuperación de cobre (izquierda) y consumo de ácido (derecha). Fuente: Silva (2022)

El rol del modelo fenomenológico en el modelo integrado es constituir una base detallada que proporciona una representación fidedigna de la lixiviación en pilas en función del tiempo y el espacio. La estrategia del modelo es discretizar el proceso, dividirlo en elementos y luego integrar estos elementos a lo largo del tiempo. Estos detalles alimentan y enriquecen el modelo general, sirviendo como insumos esenciales para la etapa de optimización que sigue. De esta manera, el modelo fenomenológico genera su *output* que ingresa como *input* para el modelo de optimización. Su objetivo en esta integración es proporcionar información precisa sobre la dinámica de la lixiviación en pilas, que luego puede ser utilizada para tomar decisiones optimizadas en el contexto más amplio del modelo integrado.

1.4.3 Modelo de Optimización

El modelo de optimización que conforma la segunda etapa del modelo integrado es una herramienta matemática, diseñada para gestionar y planificar de manera eficiente el riego en pilas de lixiviación. Su objetivo primordial es maximizar la recuperación total del mineral, garantizando el mínimo gasto de recursos para ello.

El problema que busca resolver consiste en determinar dónde y cuándo regar la solución lixivante en la pila, teniendo en cuenta las restricciones operacionales y la disponibilidad de recursos.

En el proceso de regado es fundamental considerar las variables: tiempo de planificación de regado; secciones de la pila a regar y la cantidad de ácido regado a la pila. A partir de esto, para modelar el proceso, el modelo de optimización discretiza estas variables según (Silva, 2022):

- Horizonte temporal de planificación: se discretiza en periodos de regado regulares $t \in \{1, 2, \dots, T\} = T$.
- Secciones de la pila a regar: son discretizadas en módulos $m \in \{1, 2, \dots, M\} = M$. Estos módulos representan volúmenes de formas regulares, tal como se observa en la Figura 14.
- Cantidad de ácido regado a la pila: se discretiza en unidades de riego fijas, denominadas UR. Una UR se interpreta como el riego aplicado sobre un módulo i de la pila durante un periodo de tiempo a una tasa de riego definida.
- Además, se define Q como el total de UR disponibles para regar la pila y q , que corresponde a un índice de cantidad de UR regadas de un cierto módulo.

Luego, el modelo toma los siguientes supuestos:

- Los módulos son independientes entre sí en términos de producción, por lo tanto, no hay recuperación por riego indirecto.
- La recuperación depende de las UR total regadas en cada módulo, no del tiempo específico en que se aplicaron.
- Disponibilidad de ácido: No se deja ácido disponible para regar módulos adyacentes. Es decir, la cantidad de ácido remanente en un módulo regado, que podría contribuir a la recuperación indirecta de cobre en módulos adyacentes, se considera despreciable para este estudio.
- Tasa constante de riego: En cada periodo en que se decide regar, se hace a una tasa constante.

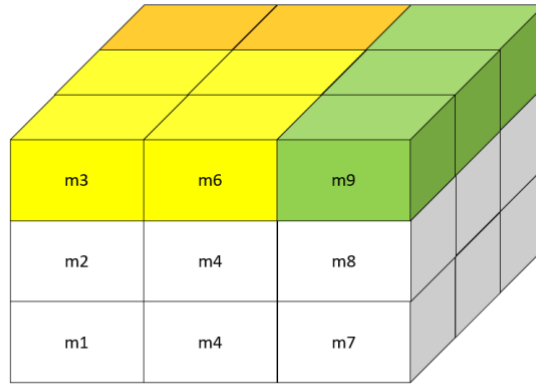


Figura 14: Representación esquemática de una pila de lixiviación discretizada en módulo. Fuente: Silva (2022)

El modelo de optimización presentado se basa en técnicas de programación lineal entera, que trata con problemas de decisión, busca optimizar un objetivo y está sujeto a ciertas restricciones. Para ello, esta metodología considera parámetros, variables de decisión, y función objetivo, las cuales se explican brevemente a continuación:

Elementos del modelo de optimización para el riego de pilas de lixiviación (Silva, 2022):

Parámetros

- p_{mq} : es la cantidad de mineral recuperado del módulo m cuando es lixiviado hasta la q -ésima UR.
- Y_{mt} : función indicatriz¹ que indica si el módulo m está disponible o no para el riego en el tiempo t .
- L_m : es la cantidad de períodos que transcurren hasta que el módulo m se agote de mineral completamente.

Variables de decisión:

El modelo define dos variables de decisión para el problema, según:

$$x_{mt} = \begin{cases} 1, & \text{si se regó el módulo } m \text{ en el periodo } t \\ 0, & \text{si no se regó} \end{cases}$$

$$y_{mq} = \begin{cases} 1, & \text{si se regó el módulo } m \text{ en la UR } - q \\ 0, & \text{si no se regó} \end{cases}$$

Estas son las incógnitas del problema y el modelo trabaja para dar valores óptimos a estas variables, de manera de ir formando el plan de riego optimizado.

¹ Función que toma un valor de 1 o 0 dependiendo de si una cierta condición se cumple o no. Es igual a 1 cuando es “sí” e igual a 0 cuando es “no”.

Función Objetivo:

La función objetivo tiene 2 instancias. La primera maximiza la recuperación total del mineral, y se expresa como:

$$\max \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} p_{mq} \cdot y_{mq}$$

De esta función se obtiene la producción máxima posible P .

La segunda instancia busca minimizar el riego total, así se gasta el menor de los recursos. La nueva función se expresa según:

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{mt}$$

Para asegurar que ambas instancias de optimización se cumplan, se agrega a la nueva función una restricción de producción de mineral, tal que esta sea mayor o igual a P .

Restricciones:

- i) Cuando un módulo se termina de regar este se agota y no puede volver a ser regado.
- ii) Las variables x e y deben coincidir en el riego, garantizando que, para cada módulo, el número de periodos en los que se riegue coincida con el número de UR regadas.
- iii) Los módulos se riegan a lo más en L_m periodos.
- iv) Se limita el riego a la disponibilidad máxima Q de UR.
- v) Todos los módulos que están en la misma área de riego deben ser regados de la misma manera durante cada período t .
- vi) Condiciones de riego uniforme en las áreas.
- vii) Cada módulo tiene un tiempo mínimo de riego t^{min} en el que se debe regar.
- viii) Restricción de producción mínima, que debe ser igual o mayor a P .

Datos del modelo: Inputs y Outputs

El modelo de optimización es alimentado por los datos del modelo fenomenológico resultantes del caso base E_0 , estos datos corresponden a las curvas de recuperación de mineral de cada módulo, proporcionando así los datos para el parámetro p_{mq} . El caso de estudio de este modelo fue aplicado a minerales oxidados de cobre.

Como resultado de la optimización, el modelo proporciona un esquema de plan de riego para el horizonte temporal completo de planificación. Este esquema está relacionado con la pila del caso en estudio y su diseño operativo. A continuación, se muestra la pila de lixiviación en la que se implementó el modelo de optimización, correspondiente al caso de una pila de óxidos de cobre, con el objetivo de mostrar el esquema obtenido y explicar cómo interpretarlo.

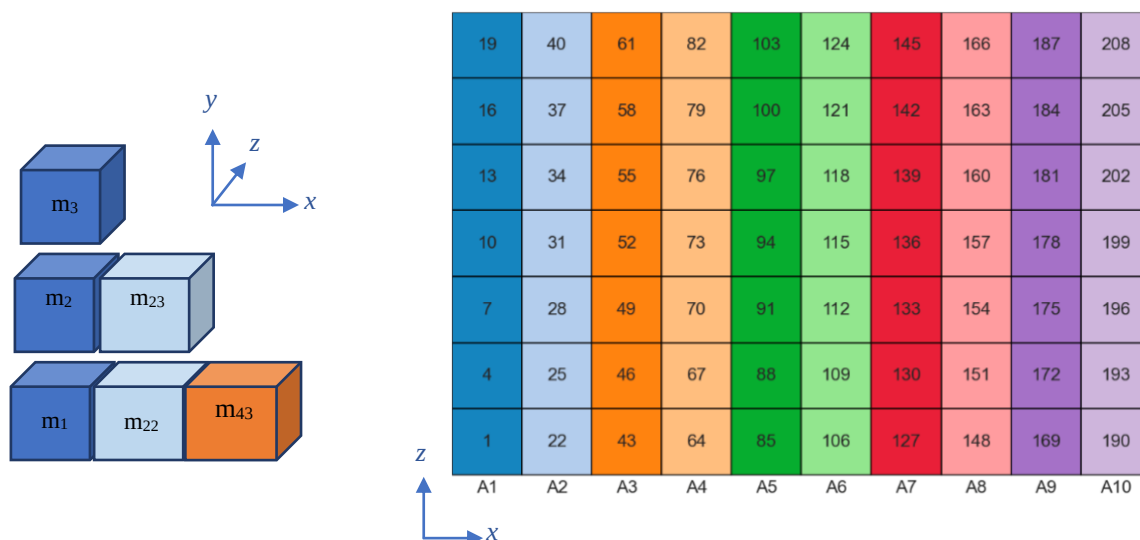


Figura 15: Esquema de construcción y enumeración de los módulos del primer piso de la pila caso óxidos de cobre. Fuente: Silva (2022)

La Figura 15 muestra una pila sintética a escala real, donde los módulos se enumeran de abajo hacia arriba, subiendo en pisos como se muestra en la figura tridimensional a la izquierda. La enumeración continúa como se observa en la vista de la derecha, la cual corresponde a la vista de planta del primer piso de la pila. De esta forma, la pila considera 3 pisos, 210 módulos de igual dimensión y 30 áreas de riego común (10 por piso) tipificadas como A1, A2, ..., A30. La pila se construye secuencialmente por área de riego, es decir, se construye A1, luego A2 y así hasta construir el primer piso, luego A11 corresponde al área de riego del segundo piso, que se construye sobre A1.

Para representar un esquema de riego, se consideran periodos de disponibilidad. Según esto, todos los módulos que pertenecen al área de riego A1 están disponibles cierto tiempo para ser regados y así para cada área de riego definida. Para el caso de aplicación del modelo, cada área tiene un intervalo de tiempo de 28 meses en el cual estará disponible para ser regada. De esta forma, se genera el siguiente esquema:

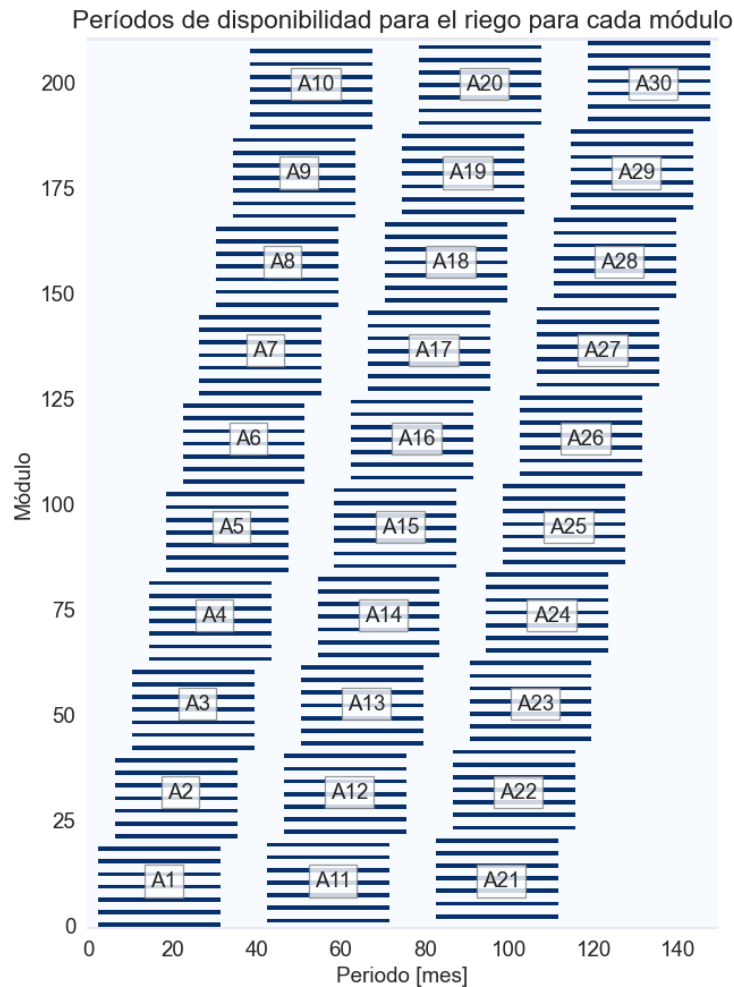


Figura 16: Períodos de disponibilidad para el riego de cada módulo de una pila de óxidos de cobre.
Fuente: Silva (2022)

En la Figura 16 se encuentra la disponibilidad de riego para cada módulo que compone la pila. Cada línea de color azul se interpreta como el periodo del horizonte temporal de planificación en que cada módulo está disponible para ser regado. Mediante este esquema de disponibilidad se representa el plan de riego que entrega el modelo de optimización.

Finalmente, el *output* final del modelo de optimización, para un caso de estudio aplicado a minerales oxidados de cobre, con una tasa de riego constante y un Q definido, se presenta en la Figura 17.

Al observar la disponibilidad de riego de cada módulo en la Figura 17, existen discontinuidades en las líneas en comparación con las de la Figura 16. Estas discontinuidades se traducen como un periodo de tiempo que el modelo decidió no regar, dado que no era óptimo. Así se obtiene un plan de riego para una pila de lixiviación durante toda su operación, que indica cuando y por cuanto tiempo se debe regar cada módulo de la pila para lograr resultados de producción optimizados.

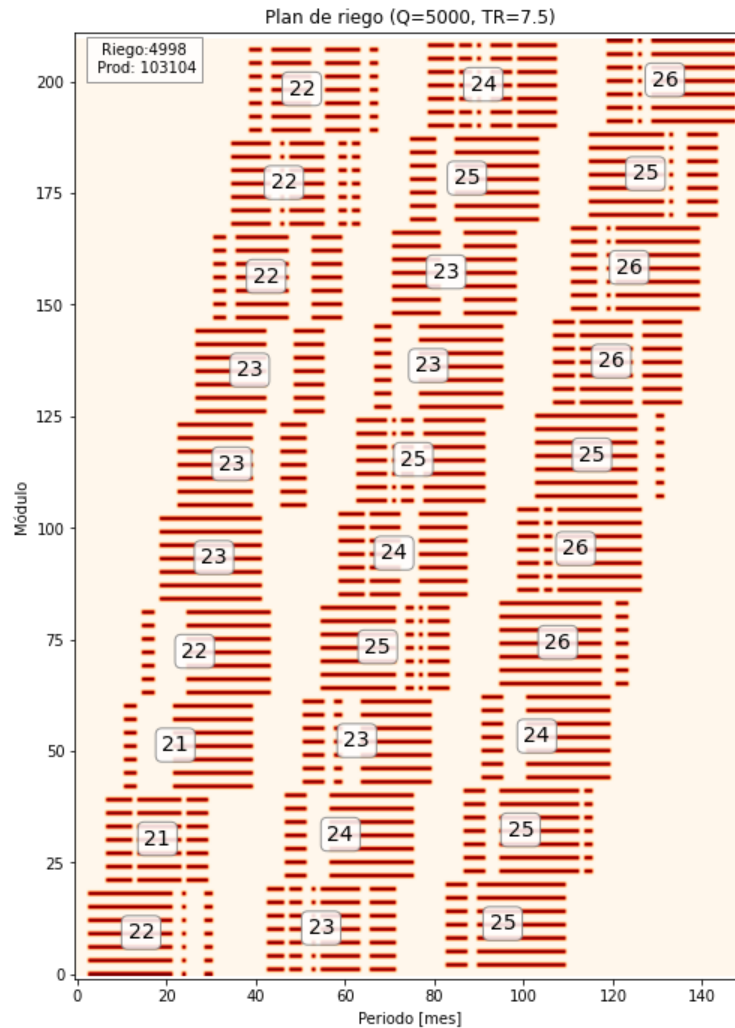


Figura 17: Plan de riego caso óxidos de cobre, entregado por modelo de optimización para TR=7.5 [L/h/m²] y disponibilidad Q=5000 [UR]. Fuente: Silva (2022)

Importancia del modelo de optimización y oportunidades de mejora

El proceso de planificación del riego en pilas de lixiviación es un componente crítico en la planificación minera de largo plazo. Su adecuada gestión tiene repercusiones directas en la eficiencia y rentabilidad del proceso minero. Dado el alto valor de los insumos en un entorno industrial con una demanda constante de mineral, es importante tener un plan de riego optimizado y estructurado. Aquí es donde el modelo de optimización adquiere protagonismo. Al integrarlo con enfoques fenomenológicos, se logra una representación más realista del proceso de lixiviación. Esta combinación no solo permite tomar decisiones operativas más acertadas, sino que también puede traducirse en un aumento significativo de las ganancias.

El potencial del modelo de optimización no solo radica en su capacidad de aportar una nueva metodología de planificación, sino también en ser una plataforma sólida y robusta para investigaciones futuras, adaptándose a diferentes escenarios industriales. Esto lo posiciona como una herramienta de valor, innovadora y esencial para una minería y procesamiento en pilas de lixiviación más sustentable y eficiente.

Sin embargo, según Silva (2022), aún existen oportunidades de mejora. Se pueden explorar enfoques que incluyan variables como el consumo específico de ácido y la recuperación indirecta de mineral, así como adaptaciones a tasas de riego variables. En este sentido, sería beneficioso incorporar una perspectiva económica en la función objetivo del modelo para optimizar según criterios más alineados con las necesidades y la rentabilidad demandada por la industria minera.

2. Estado del arte

El estudio del proceso de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre ha adquirido relevancia en los últimos años. En la actualidad, estas investigaciones se han orientado, primordialmente, hacia dos vertientes: el modelamiento de los fenómenos que ocurren dentro de la pila y la optimización de la lixiviación misma.

En el ámbito fenomenológico, los esfuerzos se han concentrado en el estudio de aspectos como el transporte de especies y las reacciones químicas de disolución y precipitación, para obtener una previsión de la producción. La técnica CFD (*computational fluid dynamics*) ha sido uno de los enfoques más aplicados, ya que permite simular el comportamiento de los fluidos dentro de medios porosos, característicos de las pilas de lixiviación. Este enfoque facilita la resolución de problemas de flujo de fluidos al discretizar la pila en elementos finitos y realizar cálculos con técnicas numéricas y algoritmos. Estos últimos permiten modelar el número de especies en cada fase a lo largo del proceso (McBride et al., 2012; Cai, 2016). En otro estudio, McBride et al. (2018) expusieron tipos de modelos fenomenológicos aplicables a las pilas de lixiviación.

Por otro lado, en la esfera de la optimización, la investigación se ha centrado en la búsqueda de un conjunto óptimo de parámetros de diseño y operación que mejoren la eficiencia económica, al tiempo que reducen costos. Diversos estudios, como el de Padilla et al. (2008), han propuesto enfoques centrados en maximizar la recuperación de mineral ajustando variables como el tiempo de lixiviación y la altura de la pila. Otros, como Mellado et al. (2011), han enfocado sus esfuerzos en determinar la tasa de riego óptima usando un modelo analítico que fusiona un modelo tipo Bernoulli con relaciones fenomenológicas. Siguiendo esta línea, Saldaña et al. (2019) exploraron soluciones óptimas para maximizar la recuperación de cobre, considerando modos de operación distintos para dos tipos de mineral ingresado al proceso de lixiviación.

En otra línea de investigación respecto a la optimización, se han estudiado metodologías para el diseño y planificación de las pilas de lixiviación, con el fin de optimizar el proceso completo. Trujillo et al. (2014) propusieron el uso de superestructuras para capturar todas las posibles opciones en el ciclo de lixiviación y la extracción por solventes, teniendo en cuenta distintos factores de ingresos, costos y parámetros operativos. Usaron un modelo de optimización lineal mixto para optimizar el proceso, evidenciando en sus resultados que factores como la altura de la pila y su diseño de construcción influyen en la eficiencia de recuperación y la operatividad dentro de la misma. De manera similar, Hernández et al. (2017) usa superestructuras para analizar las opciones LX-SX, pero incluyendo la influencia de la tasa de riego. Determinaron que tasas de riego elevadas aceleran el proceso de recuperación, pero a su vez se producen una solución más diluida, incrementando los ciclos de lixiviación.

Desde el punto de vista comercial, algunas empresas han centrado sus esfuerzos en el desarrollo de softwares especializados para las pilas de lixiviación mediante modelación fenomenológica, buscando aproximarse a la realidad del proceso. En ese camino, ElementProcess (2022) introdujo HeapSmart, una plataforma que emula las pilas de LX, presentando proyecciones de producción (basadas en equilibrio metalúrgico), administración del agua, y un registro detallado de elementos en la pila. Esto facilita el testeado de distintos escenarios y la identificación de parámetros operativos y de diseño para decisiones informadas. Siguiendo esta tendencia, Forte Dynamics (2022) presentó Opencontour, un software que cuenta con una representación 3D del proceso de lixiviación en pila, ofreciendo un rastreo integral del mineral y modelos de recuperación para analizar diversas tácticas productivas.

Otras empresas han avanzado en medir, controlar y sugerir ciertos parámetros operativos para las pilas de lixiviación implementando la inteligencia artificial (IA) en sus soluciones. Por ejemplo, IntelliSense.io (2022) ideó un sistema basado en IA que notifica en tiempo real sobre áreas problemáticas de la pila, materiales potencialmente generadores de finos, y áreas con alta retención de humedad, brindando además guías para el riego de diversos segmentos. Duhovit (2022) lanzó SmartPLS, otro software que aprovecha la IA, monitoreando en vivo el sistema, ofreciendo recomendaciones, simulando técnicas de riego, y gestionando válvulas automáticamente para asegurar un uso eficiente del agua.

De esta manera, de acuerdo con la revisión bibliográfica, se advierte que los enfoques de optimización para pilas de lixiviación se han centrado en proponer parámetros de diseño y valores de algunas variables operativas como el tiempo y la tasa de riego. Sin embargo, estos operan asumiendo estrategias de riego estáticas, por lo que se pierde la oportunidad de evaluación para diferentes estrategias al regar y los efectos que puedan producir. Además, dichos estudios enfocan sus esfuerzos en maximizar la recuperación del cobre sin considerar la minimización de los costos asociados en el proceso. En este sentido, y considerando la exploración de software comercial, no hay evidencia de herramientas actuales que optimicen la estrategia de riego para todo el horizonte temporal del proyecto, ni de optimizaciones del proceso de riego que consideren la evaluación de sus costos asociados al generar el riego.

III. Metodología

La metodología constituye el núcleo esencial de este trabajo de memoria, proporcionando la estructura sobre la cual se construye el análisis y se fundamentan los resultados. Para llevar a cabo el desarrollo de la valorización económica de pilas de lixiviación de sulfuros de cobre, la metodología de trabajo se articuló en dos etapas: primero, se enfocó en la creación de un modelo de valorización económica; segundo, se concentró en la integración de este modelo dentro de un modelo de optimización preexistente (presentado en II. 1.4.3). El propósito de esta integración es optimizar el flujo de caja operacional, refinando y potenciando el modelo de optimización existente. Esto permite formular un plan de riego más eficaz que integre consideraciones económicas.

En las secciones siguientes, se expone en detalle la implementación de estas dos fases metodológicas.

1. Valorización económica para lixiviación en pilas de sulfuros de cobre

En esta sección se detalla el enfoque metodológico y las ecuaciones desarrolladas para cuantificar el valor económico del proceso de lixiviación en pilas, aplicado a minerales sulfurados de cobre.

1.1 Identificación y caracterización de factores económicos

Para efectuar la valorización, se construye una ecuación basada en los flujos de caja descontados, descrito en II. 1.3.1. La ecuación requiere la definición precisa de las siguientes variables: flujo de caja en el tiempo $FC(t)$; tiempo (t) y tasa de descuento (k). La elección de estos factores es fundamental, ya que determinan la viabilidad financiera del proyecto y su capacidad para generar valor a lo largo del tiempo. En el caso del tiempo (t), este se sincroniza con el marco temporal de periodos discretizados empleado en el modelo de optimización. La tasa de descuento (k) por su parte, se considera constante y se determina a través de una investigación de valores referenciales basados en estándares de la industria minera.

El flujo de efectivo en el tiempo $FC(t)$, que considera la dinámica de costos e ingresos, emerge como el componente más complejo. Para su definición se llevó a cabo una investigación, identificando y caracterizando los siguientes factores económicos, a través de una metodología que incluyó revisión bibliográfica, análisis de datos estadísticos históricos, memorias anuales de empresas líderes y consultas con expertos del sector.

Factores asociados a ingresos:

- **Precio del cobre:** un parámetro dictado por el mercado de metales, fundamentalmente por la London Metal Exchange (LME) y, en menor medida, por la Commodity Exchange (Comex), siendo la LME el principal referente en Chile. Las fluctuaciones en el precio del cobre son un indicador crítico para la

valorización económica debido a su impacto directo sobre los ingresos potenciales.

- **Costo de venta:** se refiere a los gastos generados en la producción del cobre.

Factores asociados a costos:

Estos factores se identifican como los Costos operacionales (OPEX, por su nombre en inglés *Operational Expenditure*), los que constituyen los gastos recurrentes derivados de la ejecución del proceso de lixiviación. Para este estudio, la estructura de costos en el proceso de lixiviación de sulfuros de cobre se divide en dos categorías principales: costos fijos y costos variables. La correcta identificación y caracterización de estos costos son esenciales para modelar con precisión el flujo de caja.

Los costos fijos se consideran en esa categoría ya que no varían significativamente durante el proceso del riego en la lixiviación. Estos incluyen:

- Costo por remuneraciones: asociados a la mano de obra e incluye los salarios de los trabajadores directos y contratistas.
- Costo por combustible: asociado a la actividad de logística y transporte, donde su mayor gasto se traduce en combustible.
- Costo por servicios de terceros: asociado a mantenimiento, reparaciones y costos ambientales.
- Costo por depreciación: asociado a la depreciación de los activos.

Estos costos se mantienen relativamente constantes y son determinados a partir de datos referenciales de la industria y del análisis de la investigación de mercado.

Por otro lado, los costos variables fluctúan directamente con el nivel de producción o actividad, ya que van cambiando según va transcurriendo la lixiviación. Son cruciales para el cálculo de los costos operativos totales en cada periodo y están asociados a los recursos consumibles, determinados para el estudio como los insumos críticos, ya que son los de mayor relevancia para la operación. Los insumos críticos son: Ácido sulfúrico, Energía, Agua, Sal y/o Bacterias. A partir de esto, se definen los costos asociados como:

- **Costo Ácido:** relacionado con el consumo de ácido sulfúrico para el riego. Se ve afectado por:
 - Precio del ácido
 - Consumo ácido
 - Tasa de recirculación
- **Costo Energía:** implica los costos de bombeo de soluciones. A su vez, las soluciones consideradas son la solución de riego, aire (aireación forzada) y PLS. Así, el costo de la energía depende de:
 - Precio de la energía
 - Tiempo de riego

- Potencia hidráulica necesaria para impulsar las soluciones, considerando que cada bombeo de cada solución se modela según sus respectivas condiciones de transporte hidráulico y parámetros de diseño, los cuales serán descritos en las siguientes secciones.
- **Costo Agua:** vinculado al uso de agua fresca². Este costo varía con:
 - Precio del agua
 - Make-up³ de agua
- **Costo Sal:** asociado al consumo de sal clorurada en el caso de lixiviaciones en ambiente cloruro. Está influenciado por:
 - Precio de la sal
 - Consumo de sal
 - Se considera para el estudio el uso de cloruro de sodio (NaCl) como la sal para este tipo de lixiviación.
- **Costo Bacterias:** asociado a la inoculación y uso de bacterias necesarias para el caso de la biolixiviación.

La identificación de estos factores económicos es el resultado de un análisis minucioso y son considerados en el modelo por su influencia significativa en la determinación de los costos operativos y la generación de ingresos del proceso de lixiviación, configurando así la base para una evaluación económica robusta y confiable.

1.2 Desarrollo valorización económica: ecuaciones

A partir del metal recuperado desde cada módulo se debe valorizar económicamente el beneficio que se obtiene, atendiendo a todos los factores involucrados en este proceso. El siguiente paso entonces, fue relacionar los factores entre sí de forma matemática para poder calcular sus valores correspondientes de ingresos y costos. De esta forma se construyeron ecuaciones que caracterizan el proceso de lixiviación en pila, aplicable al procesamiento de sulfuros de cobre.

Cada ecuación descrita corresponde a un periodo de tiempo t durante todo el horizonte de planificación de la lixiviación, es decir, los ingresos y costos que se calculan a través de las ecuaciones son los de cierto periodo t , dentro de todo el proceso de lixiviación.

A continuación, se presentan las ecuaciones que permiten estimar los distintos costos asociados al proceso y el beneficio económico producto de la recuperación del metal, con la descripción de cada parámetro que las compone.

² En el contexto de la minería se refiere al agua que no ha sido previamente utilizada en el proceso minero o que no contiene una concentración significativa de sales, minerales o contaminantes.

³ Agua fresca que se añade a un sistema para reemplazar la cantidad perdida debido a evaporación, infiltración, uso en procesos o tratamientos, o cualquier otra forma de consumo dentro de las operaciones mineras.

Ingresos:

$$I(t) = (P_{Cu} - C_v) \cdot p(t) \cdot 2204,62 \quad (1)$$

Donde:

- $I(t)$: Ingresos [USD]
- P_{Cu} : Precio del cobre [USD/lb]
- C_v : Costo de venta [USD/lb]
- $p(t)$: producción de cobre [ton_{Cu}]

En este caso, la producción de cobre se obtiene a partir de las curvas de recuperación de cobre, lo que define su dependencia del tiempo. Esto se explica con más detalle en 2.1.1.

Por otro lado, para los propósitos de este estudio, el costo de venta se considera en el contexto de la comercialización de cátodos de cobre. La valorización económica abarca la lixiviación desde el comienzo del riego hasta la conclusión de la fase de colección de la solución rica en cobre (PLS). Por ende, el costo de venta debe incluir los gastos asociados con los procesos de extracción por solventes (SX) y de electro obtención (EW), dado que son necesarios para convertir el PLS en cátodos de cobre de alta pureza.

Costos:

Como se planteó en la sección anterior, los costos totales (C_{Total}) de la operación corresponden a la suma de los costos fijos y los costos variables:

$$C_{Total}(t) = C_{Fijos}(t) + C_{Variables}(t) \quad (2)$$

Donde el costo total está en [USD]. Los costos fijos y variables se desglosan a continuación:

Costos Fijos

Los costos fijos corresponden a la suma de todos los costos descritos en la sección 3.1.1, según:

$$C_{Fijos}(t) = (C_{Rem} + C_{Comb} + C_{Serv} + C_{Dep}) \cdot (2024,62/100) \cdot L_{Cu} \cdot mp(t) \quad (3)$$

Donde:

- $C_{Fijos}(t)$: Costos fijos en el tiempo t [USD]
- C_{Rem} : Costo por remuneraciones [cUSD/lb]
- C_{Comb} : Costo por combustible [cUSD/lb]
- C_{Serv} : Costo por servicios [cUSD/lb]
- C_{Dep} : Costo por depreciación [cUSD/lb]
- $mp(t)$: masa procesada de mineral al tiempo t [ton_{mineral}]
- L_{Cu} : Ley de cobre en el mineral %

Notar que se multiplica por factor de conversión de unidades para pasar de [cUSD/lb] a [USD/ton].

Es importante aclarar que si bien los costos fijos se consideran fijos porque se toman como valores constantes, para operar con ellos se deben convertir sus unidades a dólares, por lo que se multiplican por la masa procesada en el tiempo t , agregándole la temporalidad obteniendo un “costo fijo en el tiempo t ”.

Costos Variables

Los parámetros de costos se establecieron para reflejar de manera precisa el proceso, basándose en el conocimiento e información previamente conocidos en la industria y disponibles de consultar, así como en la facilidad de cálculo. Se buscó un equilibrio entre estos aspectos para determinar el método más eficiente de estimación de costos. De esta forma, se definieron:

- **Costo Ácido sulfúrico (C_{ac}):**

$$C_{ac}(t) = P_{ac} \cdot Cons_{ac} \cdot 10^{-3} \cdot mp(t) \cdot (1 - R_{ac}) \quad (4)$$

Donde:

- $C_{ac}(t)$: Costo de ácido sulfúrico en el tiempo t [USD]
- P_{ac} : Precio unitario del ácido sulfurico [USD/ton_{ac}]
- $Cons_{ac}$: Consumo de ácido sulfúrico por tonelada de mineral procesado [Kg_{ac}/ton_{mineral}]
- $mp(t)$: masa procesada de mineral al tiempo t [ton_{mineral}]
- R_{ac} : Recirculación de ácido sulfúrico %

Notar que el factor 10^{-3} proviene de la conversión de unidades de Kg_{ac} a ton_{ac} .

- **Costo Energía (C_{en}):**

$$C_{en}(t) = P_{en} \cdot \frac{\sum_i Ph_i}{\eta_{bomba}} \cdot t_r \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

Donde:

- $C_{en}(t)$: Costo de energía en el tiempo t [USD]
- P_{en} : Precio unitario de la energía eléctrica [USD/MWh]
- El subíndice i se refiere a la solución que será transportada en el proceso. Hay tres soluciones consideradas:
 - S_n : solución lixivante o solución de riego
 - *aire*: solución usada como agente oxidante mediante aireación forzada
 - *PLS*: Pregnant Leach Solution o Solución enriquecida de cobre

Por lo tanto: $i \in \{S_n, aire, PLS\}$

- Ph_i : Potencia hidráulica necesaria para mover las i soluciones [W]
- η_{bomba} : Eficiencia de la bomba que impulsa las soluciones
- t_r : tiempo de riego [h]

Notar que el 10^{-6} proviene de la conversión de unidades de W de la potencia a MW .

Para determinar la potencia hidráulica necesaria de cada solución, esta se apertura para estimar de mejor manera su valor considerando las condiciones de operación, según:

$$Ph_i = Q_i \cdot \left[(z_{f_i} - z_{0_i}) + h_{f_i}(1 + h_{s_i}) \right] \cdot [\rho_i \cdot g] \quad (6)$$

Donde:

- Q_i : Caudal de la solución i [m^3/h]
- z_{f_i} : cota final de i [m]
- z_{0_i} : cota inicial de i [m]
- h_{f_i} : pérdidas de potencia en i [m]
- h_{s_i} : pérdidas de potencia por singularidades en i [m]
- ρ_i : densidad de la solución i [kg/m^3]
- g : aceleración de gravedad [m/s^2]

A su vez, el caudal de la solución está dado por:

$$Q_i = TR_i \cdot A_R \quad (7)$$

Con:

- TR : tasa de riego i [$L/h/m^2$]
- A_R : área de riego [m^2]

Y las pérdidas de potencia se estiman como:

$$h_{f_i} = \frac{8 \cdot f \cdot L_i \cdot Q_i^2}{d_{tub_i}^5 \cdot \pi^2 \cdot g} \quad (8)$$

Con:

- f : factor de fricción
- L_i : longitud recorrida por la solución i [m]
- d_{tub_i} : diametro de tubería por la que pasa la solución i [m]

Donde:

$$d_{tub_i} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_i}{v_i \cdot \pi}} \quad (9)$$

v_i : velocidad de la solución i [m/s]

- **Costo Agua (C_{agua}):**

$$C_{agua}(t) = P_{agua} \cdot M_{up} \cdot mp(t) \quad (10)$$

Donde:

- $C_{agua}(t)$: Costo agua en el tiempo t [USD]
- P_{agua} : Precio unitario de agua fresca [USD/m³]
- M_{up} : Makeup de agua [m³/ton]
- $mp(t)$: masa procesada de mineral al tiempo t [ton_{mineral}]

- **Costo sal (C_{sal}):**

$$C_{sal}(t) = \begin{cases} P_{sal} \cdot Cons_{sal} \cdot 10^{-3} \cdot mp(t), & \text{Si LX en ambiente cloro} \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (11)$$

Donde:

- $C_{sal}(t)$: Costo sal clorurada, asociada a lixiviación en ambiente cloro [USD]
- P_{sal} : Precio unitario de la sal clorurada [USD/ton_{sal}]
- $Cons_{sal}$: Consumo de sal por tonelada de mineral procesada [kg_{sal}/ton_{mineral}]
- $mp(t)$: masa procesada de mineral al tiempo t [ton_{mineral}]

Notar que el 10^{-3} proviene de la conversión de unidades de Kg_{sal} a ton_{sal} .

Este costo se incluye en la sumatoria de costos solo en el caso de que se trate de lixiviación en ambiente clorurado.

Para el caso de lixiviación en ambiente clorurado, esta investigación consideró el uso de la sal Cloruro de Sodio (NaCl).

- **Costo bacterias (C_{bact}):**

$$C_{bact}(t) = \begin{cases} C_{bact_b} \cdot mp(t), & \text{si es biolixiviación} \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (12)$$

Donde:

- $C_{bact}(t)$: Costo de bacterias en el tiempo t [USD]
- C_{bact_b} : Costo de bacterias en biolixiviación [USD/ton_{mineral}]
- $mp(t)$: masa procesada de mineral al tiempo t [ton_{mineral}]

Este costo se incluye en la sumatoria de costos solo en el caso de que se trate de biolixiviación.

Se realizaron múltiples intentos para la cuantificación y caracterización del costo relacionado con las bacterias. Sin embargo, la insuficiencia de datos disponibles impidió la obtención precisa de sus parámetros. Como resultado, se optó por establecer este costo como una constante validada por un experto en la materia. Dado que este costo representa una fracción mínima en comparación con otros dentro de la misma categoría, se consideró que su fijación no ejercería un impacto sustancial en los resultados finales.

De esta forma, los costos variables en el tiempo t se obtienen según:

$$C_{Variables}(t) = \begin{cases} C_{ac}(t) + C_{en}(t) + C_{agua}(t) + C_{bact}(t), & \text{si es biolixiviación} \\ C_{ac}(t) + C_{en}(t) + C_{agua}(t) + C_{sal}(t), & \text{si es lixiviación clorurada} \end{cases} \quad (13)$$

Con $C_{Variables}(t)$ en [USD].

Una vez definidos todos los ingresos (Ec. 1) y costos (Ec. 2), se definió la ecuación de valorización, basándose en FCD para un tiempo t del proceso de lixiviación, obteniéndose:

$$V_{LX,sulf} = \frac{I(t) - C_{Total}(t)}{(1 + k)^t} \quad (14)$$

Donde:

- k : tasa de descuento
- t : periodo de tiempo
- $V_{LX,sulf}$: Valorización económica lixiviación, caso sulfuros de cobre [USD].

Finalmente, la fórmula de valorización económica extendida para el proceso de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre es:

$$V_{LX,sulf} = \frac{(P_{Cu} - C_v) \cdot p(t) \cdot 2204,62 - C_{variables}(t) - C_{Fijos}(t)}{(1 + k)^t} \quad (15)$$

Con $V_{LX,sulf}$ indicando el valor económico para el periodo t , en unidades de [USD].

2. Modelo de Optimización: enfoque económico

2.1 Integración valorización económica en modelo de optimización

Para integrar adecuadamente el modelo de valorización económica en el Modelo de Optimización (MO) existente (cuyos detalles se encuentran en II. 1.4.3), con el fin de optimizar el plan de riego y maximizar el beneficio económico del proceso de

lixiviación en pilas, se siguió un proceso detallado y estructurado. Este proceso se articuló en seis etapas, comenzando con la adaptación de la fórmula de valorización al contexto operativo del MO, lo cual constituye el eje central de esta sección. Posteriormente, se detallan las cuatro etapas restantes, que abordan las modificaciones necesarias en el MO para incorporar una nueva función objetivo que mejore la toma de decisiones y la eficiencia del proceso de optimización.

2.1.1 Adaptación de parámetros a las variables del modelo

El MO se basa en una representación detallada de una pila de lixiviación, discretizada en módulos y unidades de riego UR, por lo tanto, el primer paso consistió en ajustar la valorización a esta configuración. La integración del modelo de valorización económica requiere un ajuste de los parámetros de valorización para alinearlos con esta estructura modular. A continuación, se describen las adaptaciones realizadas para la integración de la fórmula al modelo de optimización:

- **De la Ecuación (1): $p(t)$**

Representa la producción de cobre del proceso. En el modelo de optimización, este parámetro se cuantifica utilizando la curva de recuperación de cobre (Figura 18), proveniente del modelo fenomenológico. En esta figura, el eje x representa al tiempo o periodo del proceso de lixiviación, y el eje y representa la cantidad de cobre recuperado, que es lo mismo que la producción de cobre $p(t)$ en el tiempo t . Cada curva representa un módulo de un piso distinto de la pila de lixiviación del caso de estudio.

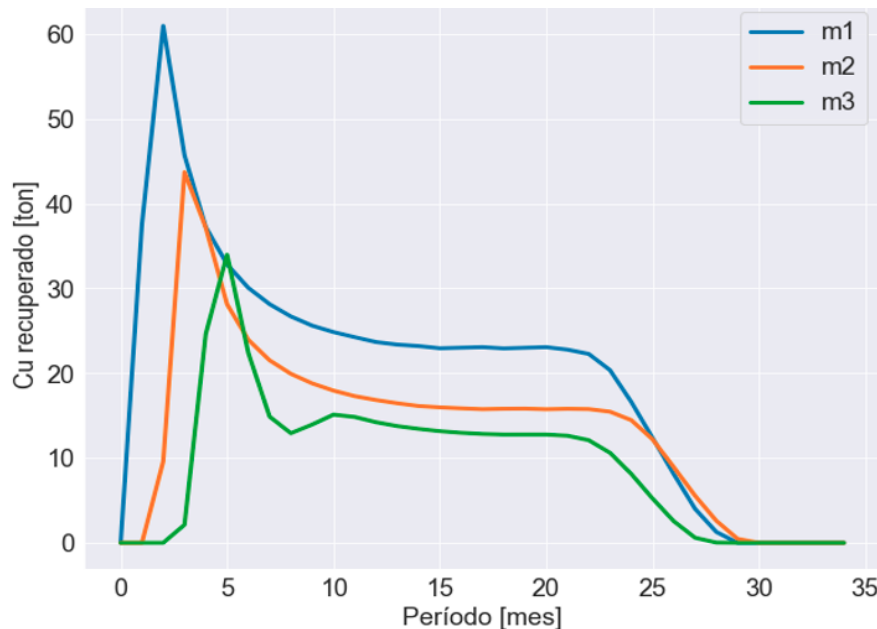


Figura 18: Curva de recuperación de cobre en el tiempo para el caso de estudio de una pila de óxidos de cobre.

- **De las Ecuaciones (3), (4), (10), (11), (12): $mp(t)$**

La masa $mp(t)$ representa la cantidad de mineral procesado durante el periodo t . Es importante recordar que el MO aborda la dimensión temporal de manera discreta,

asignada a periodos específicos de riego o UR, por módulo. Por lo tanto, la variable $mp(t)$ se adaptó para alinearse con esta estructura temporal discreta.

De esta forma, el ajuste de $mp(t)$ implicó una correspondencia directa con la variable L_m definida en el MO, la cual señala el número de meses hasta que se consume un módulo completo. Esto es una medida del tiempo durante el cual el módulo está en riego. Por lo tanto, la equivalencia que se establece para este fin es la siguiente:

$$mp(t) = Vol \cdot \rho_{ap} / L_m^{TR} \quad (16)$$

Donde

- Vol: Volumen del módulo [m^3]
- ρ_{ap} : densidad aparente de la roca [ton/m^3]
- L_m^{TR} : Cantidad de periodos que transcurren hasta que el módulo m se agote de mineral [meses]

En la variable $mp(t)$ es esencial incluir la unidad de tiempo para capturar la dinámica del proceso de lixiviación en pilas, ya que el proceso de riego y la disponibilidad del módulo están estrechamente relacionados con el tiempo. Por lo tanto, para comprender cómo evoluciona la masa procesada a lo largo del tiempo, se incorpora la dependencia temporal en $mp(t)$. Esto se logra a través de la inclusión de la variable L_m^{TR} , que indica el número de meses necesarios para que un módulo se agote. De esta manera, se establece una relación directa entre la masa procesada y el tiempo, permitiendo reflejar de forma dinámica cómo varía la cantidad de mineral procesado conforme avanza el tiempo.

• De la Ecuación (5): t_r

El parámetro t_r , que representa el tiempo de riego medido en horas, se ajustó en el MO para reflejar la discretización del tiempo. Se establece que t_r debe equivaler al tiempo de riego asignado a un módulo completo. Para lograr esta equivalencia en el MO, se definió t_r como:

$$t_r = 30 \times 24 \times L_m^{TR} \quad (17)$$

Esta fórmula ajusta t_r para sincronizarlo con los ciclos discretos de riego del modelo, donde:

- El producto (30×24) representa las horas en un mes estándar de 30 días.
- L_m^{TR} es la duración, en meses, hasta que se agota el módulo m, marcando el periodo de riego.

Esto asegura que t_r corresponda precisamente al tiempo operativo de un módulo en el plan de riego.

- **De la Ecuación (6): z_{f_i} y z_{0_i}**

Las cotas iniciales z_{0_i} y finales z_{f_i} representan las elevaciones al inicio y al final del bombeo para cada solución i . Para ilustrar y comprender la equivalencia de estas cotas dentro del MO, se desarrolló un esquema detallado que define el funcionamiento del sistema de transporte hidráulico de las soluciones, considerando las dimensiones y coordenadas que el MO puede medir y cuantificar. Este esquema se presenta a continuación:

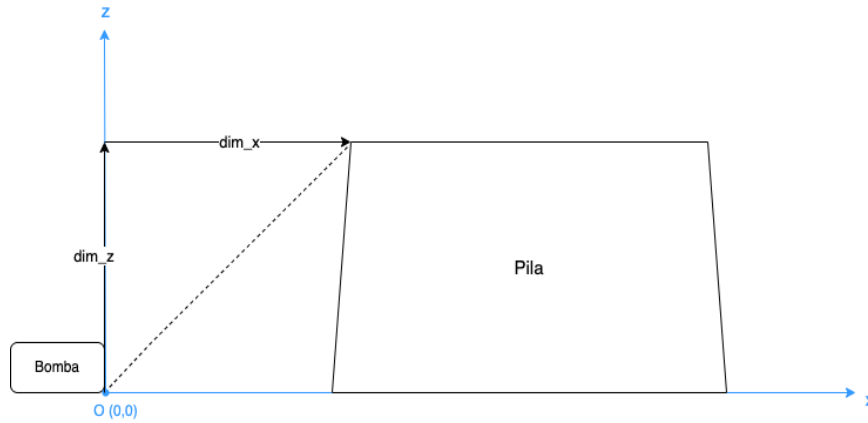


Figura 19: Esquema de coordenadas xz para transporte hidráulico en pila de lixiviación, aplicable al modelo de optimización preexistente.

La Figura 19 representa la pila en un espacio cartesiano 2D definido por los ejes xz. La bomba, situada en el origen (0,0), impulsa las soluciones desde el suelo, representando la cota inicial, ascendiendo hasta alcanzar la cota final que corresponde a la altura dim_z determinada por el módulo específico sujeto a riego.

El MO, utilizando el esquema proporcionado, asignará las cotas de la siguiente manera:

- La cota inicial para cada solución y Unidad de Riego (UR) se fija en 0 metros, lo que indica el punto de partida en la superficie del suelo:

$$z_{0_i} : \text{cota inicial de } i[m] \equiv 0$$

- La cota final, igual a dim_z representa la altura en metros a la que se bombea cada solución, determinando así la elevación máxima alcanzada durante el proceso de bombeo:

$$z_{f_i} : \text{cota final de } i[m] \equiv dim_z$$

- **De la Ecuación (7): A_R**

Área de riego de la pila de lixiviación. Dentro del MO, la pila de lixiviación se definió en un espacio tridimensional con coordenadas x , y , z (la Figura 19 proporciona una vista bidimensional de esta configuración). Para que el MO pueda calcular el área de riego de

manera precisa, esta área se adaptó a la estructura 3D de la pila. En concreto, el MO calcula el área de riego multiplicando las dimensiones en x por las dimensiones en y .

- **De la Ecuación (8): L_i y f**

- L_i : longitud recorrida por la solución i en las tuberías

Para adaptar esta variable al lenguaje del modelo, se trazó el siguiente esquema:

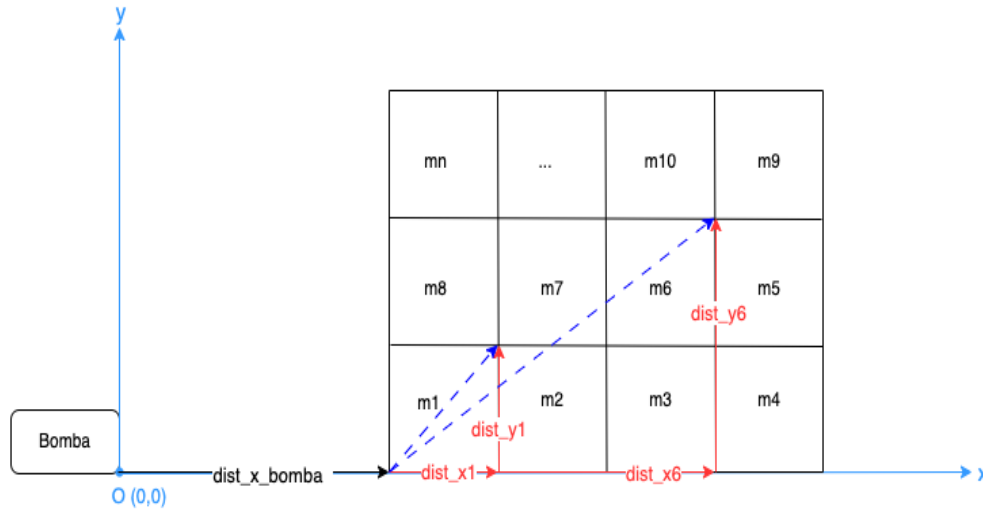


Figura 20: Vista de planta de coordenadas xy , para transporte hidráulico en pila de lixiviación, aplicable al modelo de optimización preexistente. Cada cuadrado representa un módulo m_j .

La Figura 20 presenta la vista planta xy de la pila de lixiviación (con los módulos enumerados a modo de ejemplo). La bomba se ubica en el origen del sistema y está ubicada a una distancia “ $dist_x_bomba$ ” de la pila de lixiviación. Para cada módulo j , la solución i recorre una distancia en x “ $dist_x_j$ ” más una distancia en y “ $dist_y_j$ ”, asegurando abarcar todo el módulo j hasta llegar al módulo n .

De esta manera, para que el modelo calcule las distancias recorridas L_i , se generó la siguiente equivalencia:

$$L_i \equiv dist_x_bomba + dist_x_j + dist_y_j \quad (18)$$

Donde i corresponde al tipo de solución y j corresponde al número del módulo.

- **f : factor de fricción para el cálculo de las pérdidas de potencia en tuberías.**

Para obtener este factor de manera automática a través del modelo (en contraposición a la determinación manual que requería el uso de gráficos como el diagrama de *Moody* o uso de tablas), se implementó una función en el MO. Dicha función, escrita en código Python, calcula el factor de fricción utilizando la ecuación de Colebrook-White, una fórmula reconocida para estimar el factor de fricción en flujos turbulentos dentro de tuberías, especialmente cuando se consideran efectos como la rugosidad de la tubería.

El proceso se realizó a través de un método iterativo. Inicia con un valor estimado del factor de fricción y luego, mediante sucesivas iteraciones, refina este valor para llegar a una aproximación más precisa. Este método es necesario porque la ecuación de *Colebrook-White* no se puede resolver de forma directa (analítica) debido a su naturaleza implícita y no lineal.

El método utilizado se conoce como método iterativo normal. Este método comienza con una estimación inicial del factor de fricción $f_0 = 0.02$ y, a través de iteraciones sucesivas, se ajusta este valor utilizando la ecuación de *Colebrook-White* hasta que se alcanza la convergencia. La ecuación de *Colebrook-White* es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Donde:

- f : factor de fricción de Darcy-Weisbach.
- ϵ : rugosidad absoluta de la tubería.
- D : diámetro interno de la tubería.
- Re : número de Reynolds.

Para el cálculo, se establecieron las condiciones específicas del diseño, como el número de Reynolds $Re = 4000$, que caracteriza el tipo de flujo (en este caso, turbulento), y la rugosidad relativa de la tubería $\frac{\epsilon}{D} = 0.009$, correspondiente a una tubería de *HDPE*.

El método iterativo normal procede de la siguiente manera:

1. Se calcula un término intermedio A como la rugosidad relativa dividida por 3.7.
2. Se calcula un término intermedio B como 2.51 dividido por el producto del número de Reynolds y la raíz cuadrada del factor de fricción estimado.
3. Se toma el logaritmo negativo de la suma de A y B para obtener C .
4. El nuevo valor del factor de fricción f_{nuevo} se obtiene como el cuadrado del inverso de C .

Este proceso se repite en cada iteración utilizando el nuevo valor de f calculado en la iteración anterior, hasta completar un total de 200 iteraciones. Este enfoque asegura que el factor de fricción calculado sea lo más preciso posible dentro de las condiciones de diseño especificadas, dado que se establecieron 200 iteraciones para garantizar la convergencia.

2.1.2 Integración

En el segundo paso se realizó la integración de la fórmula de valorización a MO como tal. Las ecuaciones de ingresos y costos desarrolladas, con las consideraciones de equivalencias anteriores, permitieron finalmente integrar la valorización al modelo de optimización. Estas ecuaciones son aplicables a cada módulo y dependen de la cantidad de riego utilizada.

De esta manera, la fórmula de valorización (14) es equivalente al valor económico de cada módulo regado y un tiempo dado t , estableciéndose:

$$V_{LX,sulf} \equiv \text{valor}(\text{módulo}, \text{riego}) = v_{mqt}$$

Lo anterior permite definir de forma general, para cada módulo m que es regado por la UR⁴ q en el periodo t , la nueva variable de modelo v_{mqt} , correspondiente al valor económico del módulo m , finalizando así la integración de la fórmula al modelo de optimización.

2.1.3 Variables de decisión del modelo

La variable de decisión debe indicar que áreas ‘ a ’ se deben regar y en qué periodo t hacerlo, además de hacer el seguimiento de cuantas unidades de riego (UR) q han sido utilizadas. Para ello se define:

$$x_{aqt} = \begin{cases} 1, & \text{si se regó el área } a \text{ en la UR } q \text{ en el tiempo } t \text{ o antes} \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

A partir de esto se puede definir la variable auxiliar Δx , que recupera el periodo exacto en que un área es regado por la UR q :

$$\Delta x_{aqt} = \begin{cases} x_{aqt}, & \text{si } t = 1 \\ x_{aqt} - x_{aq(t-1)}, & \text{si } t > 1 \end{cases}$$

La variable auxiliar Δx_{aqt} se utiliza para identificar si el riego ocurrió específicamente en el período de tiempo t , y no en cualquier momento antes. De esta manera, proporciona una visión clara de los eventos de riego periodo a periodo, en lugar de solo saber si el área fue regada en algún momento hasta el periodo actual.

En resumen, x_{aqt} es un indicador de si se ha regado un área hasta cierto punto en el tiempo, mientras que Δx_{aqt} es un indicador de si el riego ocurrió específicamente en el período de tiempo t .

2.1.4 Nueva función objetivo

La función objetivo busca maximizar el valor total del flujo de caja descontado del proceso. Esto se representa sumando sobre todos los módulos, periodos y UR el valor que se obtiene de un módulo m cuando es lixiviado en el periodo t cuando es regado por la UR q . La presencia de la variable de decisión Δx_{aqt} en el producto asegura que solo se sumen los valores económicos de los módulos que fueron efectivamente regados en el período t . Esto significa que no se consideran los valores económicos de módulos que no recibieron riego en ese período específico.

⁴ UR: riego que se hace sobre un módulo m de la pila durante un periodo t

$$\max \sum_a \sum_{m \in M_a} \sum_q \sum_t v_{mqt} \cdot \Delta x_{aqt}$$

Este enfoque garantiza que la maximización del valor está alineada con las acciones de riego reales y permite una asignación eficiente de recursos, al mismo tiempo que se maximiza el retorno económico ajustado por el valor del tiempo del dinero.

2.1.5 Restricciones

El conjunto de restricciones que se plantea a continuación busca capturar la buena definición del modelo y las consideraciones operacionales básicas del proceso de riego de la pila que se deben cumplir en el modelo.

i. Consistencia temporal en el riego: Para cada área $a \in A$, para cada $q \geq 1$ y para cada $t \in T$:

$$x_{aqt} \leq x_{a(q-1)t}$$

Esta restricción asegura que una vez que un área ha sido regada, se mantiene en ese estado para los periodos subsecuentes, reflejando la persistencia del riego a lo largo del tiempo.

ii. Secuencialidad del riego: Para cada área $a \in A$, para cada $q \in Q$ y para cada $t \in T$:

$$x_{aq(t-1)} \leq x_{aqt}$$

Garantiza que el riego de un área no puede ser registrado en un periodo si no fue establecido previamente, manteniendo la secuencia lógica de las acciones de riego.

iii. Limitación de solución de riego: Existe una disponibilidad máxima Q de litros para regar toda la pila:

$$\sum_{a \in A} \sum_{m \in M_a} \sum_q \sum_t Q_m \cdot x_{aqt} \leq Q$$

Define un límite en el volumen total de la solución de riego que puede ser utilizada, para asegurar que el uso total no sobrepase la cantidad disponible para la lixiviación.

iv. Capacidad de riego por módulo:

Se debe regar una cantidad de UR en un rango predefinido y cuando el módulo está disponible para ser regado. Para cada módulo $m \in M$, y para cada $t \in T$:

$$\sum_q A_{mq} t \leq Y_{mt}$$

Define la máxima cantidad de solución de riego que cada módulo puede recibir en un periodo determinado.

v. Producción máxima de PLS:

Se debe respetar una producción máxima de PLS por período. Para cada $t \in T$:

$$\sum_{a \in A} \sum_{m \in M_a} \sum_q P_{mq} \cdot x_{aqt} \leq P_{max}$$

Controla que la producción total de PLS no sobrepase un valor máximo preestablecido por período, con el objetivo de satisfacer la capacidad de procesamiento de PLS de la planta de extracción por solventes y las metas de producción.

vi. Caudal máximo de riego: Se debe respetar un caudal máximo de riego en la pila por período. Para cada $t \in T$:

$$\sum_{a \in A} \sum_{m \in M_a} \sum_q Q_m \cdot x_{aqt} \leq Q_{max}$$

La restricción limita la solución de riego que un módulo puede recibir por período al caudal máximo, asegurando la eficiencia del proceso de extracción y la sostenibilidad del sistema de irrigación.

2.2 Evaluación de la efectividad del modelo

En esta sección se presentan los métodos utilizados para evaluar la efectividad del modelo integrado tras la adición de la valorización económica. Se llevaron a cabo pruebas sobre el modelo en su totalidad y se sometieron a análisis los datos relativos a esta nueva incorporación. El objetivo era validar la exactitud de la valorización económica dentro del modelo integrado y la capacidad de este para replicar con fidelidad la operación de lixiviación en pilas para minerales sulfurados de cobre dentro de la industria minera. Esta evaluación tenía como finalidad corroborar la robustez teórica de la valorización económica y su integración en el modelo y probar su aplicabilidad práctica en el soporte de decisiones estratégicas y financieras en contextos de producción reales. Así, los métodos que se emplearon fueron:

2.2.1 Verificación de datos

Para garantizar análisis y cálculos económicos confiables en el campo de la minería, la verificación de datos se centró en obtener valores referenciales precisos y actuales para cada parámetro de la fórmula de valorización económica. Este proceso se enfocó en datos coherentes y reales del proceso de lixiviación en pilas para sulfuros de cobre.

La metodología empleada en la selección y revisión de las fuentes incluyó un análisis de literatura científica y reportes sectoriales, concentrándose en el proceso mencionado. Para ello se examinaron fuentes como memorias de empresas mineras, estadísticas de la Comisión Chilena del Cobre, informes de rendimiento minero y literatura técnica.

La calidad y exactitud de los datos se verificó mediante un examen detallado de valores unitarios y métricas de procesamiento, comparables con el caso de estudio. Se realizó una revisión continua junto a expertos y se justificaron metodológicamente los supuestos y simplificaciones, resultando en una base de datos robusta. Estos datos cubren un análisis de cinco años y proyecciones de hasta diez años, en línea con los estándares y tendencias de la industria minera del cobre.

En la etapa final, el proceso de documentación se organizó en un archivo Excel, donde se catalogó cada dato con su fuente para garantizar transparencia y trazabilidad. Los datos se clasificaron y organizaron siguiendo criterios específicos por tipo de costo e ingreso, alineándose con los parámetros industriales y la temporalidad del estudio.

2.2.2 Validación de costos

En la fase de validación de costos, se buscó asegurar la precisión y relevancia de los costos e ingresos calculados mediante la fórmula de valorización económica desarrollada para pilas de lixiviación en sulfuros de cobre. El propósito era examinar estos valores para verificar su coherencia con las realidades operativas y los estándares de la industria minera.

Proceso de Validación:

- **Cálculo de costos en el modelo:** Se empleó el modelo de optimización para calcular los costos asociados. Esto implicó la incorporación de la fórmula de valorización económica dentro del código Python y la subsiguiente generación de resultados.
- **Distribución de costos:** Los costos calculados fueron presentados porcentualmente para cada módulo para luego calcular el promedio de todos y así caracterizar la distribución de costos de la pila completa.
- **Comparación con datos externos:** Se realizó una comparativa de los datos obtenidos con una distribución de costos publicada por Cochilco, institución chilena reconocida por su precisión estadística en el ámbito minero. Esta comparación facilitó la evaluación de la congruencia de los resultados obtenidos con mediciones industriales reales.
- **Análisis de coherencia:** Se llevó a cabo una evaluación de la coherencia, fiabilidad y precisión, tanto de la fórmula de valorización económica como de los datos empleados, en función de unidades y magnitudes de los resultados.
- **Resultados esperados:** Con la conclusión de esta validación, se esperaba confirmar que los costos e ingresos calculados a través de la metodología propuesta eran coherentes y fiables. Esto no solo validaba la fórmula de valorización económica, sino que también aseguraba la aplicabilidad y relevancia del modelo de optimización en la realidad industrial minera.

2.2.3 Comparación con método de referencia

Metodología de evaluación:

Una vez completada la verificación y validación de los datos, se obtuvo un conjunto robusto y confiable de información para la ejecución del modelo integrado con

valorización económica incluida. Utilizando los resultados del modelo fenomenológico y los cálculos del modelo de optimización, se procedió a estimar el valor económico del plan de riego proporcionado por el modelo integrado. La evaluación de su rendimiento implicó una comparación con el resultado obtenido a partir de un plan de referencia base, con el objetivo de evaluar las posibles ganancias esperadas al utilizar la metodología optimizada.

Plan de riego de referencia:

Se seleccionó un plan de riego generado mediante un algoritmo *greedy*. El algoritmo *greedy* opera bajo un enfoque paso a paso, seleccionando en cada etapa la mejor opción inmediata con la esperanza de que estas elecciones locales conduzcan a una solución global óptima o al menos satisfactoria. Para generar el plan de riego referencial, el algoritmo opera de la siguiente forma: inicialmente, parte de un estado donde no se ha regado ningún área, estableciendo criterios como la producción máxima y el valor económico. A medida que avanza, evalúa periódicamente todas las áreas de riego posibles, tomando en cuenta factores como el valor económico esperado y su disponibilidad para el riego. De las opciones disponibles, selecciona la que ofrece el mayor beneficio inmediato, basado en su potencial económico y productivo, y considerando factores como la tasa de descuento.

Si existen restricciones operativas, como límites en la cantidad de agua o en la capacidad de riego, el algoritmo ajusta sus elecciones para maximizar la producción dentro de estas limitaciones. Este proceso se repite en cada período de riego, actualizando constantemente el estado de las áreas regadas y reajustando las prioridades según las condiciones cambiantes y los resultados previos.

Comparación cuantitativa:

Se realizó una comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos de ambos planes, considerando las mismas condiciones de riego y diseño. Para ello, se calcularon los valores de flujo descontado acumulado en términos monetarios tanto para el plan optimizado como para el plan *greedy*. La diferencia entre estos valores se interpreta como la ganancia potencial al utilizar la metodología optimizada en comparación con el enfoque *greedy*.

2.2.4 Análisis de sensibilidad

Se investigó cómo las variaciones en las entradas, concretamente los cambios en parámetros económicos influían en el valor proyectado del proceso de lixiviación en pilas para sulfuros de cobre. Para ello, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, enfocado en la variabilidad de los precios y consumos de los insumos. Este análisis se centró en parámetros críticos que reflejan los costos variables de la operación, identificados como los más influyentes en los resultados económicos proyectados por el modelo. Se seleccionaron variables específicas de precio y consumo, esenciales para la estructuración de los flujos descontados y, por ende, para la valorización económica.

Se reconocieron los precios como variables que dependen de las dinámicas del mercado y los consumos como reflejo de las condiciones operacionales del proceso de lixiviación en pilas. Dada su constante variabilidad, estas variables se consideraron relevantes para

el análisis de sensibilidad. Con el fin de cuantificar el impacto de las variables más significativas en los flujos descontados, se ejecutaron simulaciones variando sistemáticamente los parámetros y los rangos de variación de sus valores se determinaron basándose en análisis históricos y proyecciones futuras, lo cual permite incluir en el análisis posibles escenarios económicos. La selección de estos rangos y parámetros se apoyó en la disponibilidad de datos históricos y en las prácticas estandarizadas de manejo industrial. Así, se establecieron ocho casos de valores para el análisis por cada parámetro. Los parámetros y sus rangos de análisis se detallan en caso de estudio.

Los resultados de estas simulaciones se visualizaron en un gráfico de variación de parámetros vs el flujo descontado correspondiente a cada caso del rango evaluado, lo que facilitó significativamente la interpretación de la sensibilidad del valor económico ante cada variable. Se generaron curvas de respuesta para cada parámetro, representando la correlación entre la variabilidad de los insumos y el valor descontado resultante.

3. Resumen esquemático de la metodología

A continuación, se presenta un esquema que resume la metodología aplicada en este trabajo de memoria.

La Figura 21 destaca los dos componentes metodológicos clave del estudio:

Primero, el desarrollo del modelo de valorización económica, terminando con la formulación de una ecuación específica para la valorización. Este proceso constituye la base para el análisis económico del proyecto.

Segundo, se muestra la integración del modelo de valorización económica al modelo de optimización existente, señalada mediante flechas de color rosa. Esta integración es fundamental, ya que implica la modificación, sustitución y adición de condiciones y parámetros nuevos al modelo de optimización.

La metodología, por tanto, se enfoca primero en la construcción de un marco para la valorización económica dentro del contexto de un modelo de optimización ya establecido. Posteriormente, se incorpora este marco al modelo existente, ajustando y redefiniendo sus premisas. Este proceso refinado de toma de decisiones es una mejora significativa respecto a las prácticas previas, permitiendo la generación de un plan de riego optimizado. El objetivo final es maximizar el valor económico en el proceso de lixiviación en pilas, específicamente para la extracción de cobre a partir de minerales sulfurados.

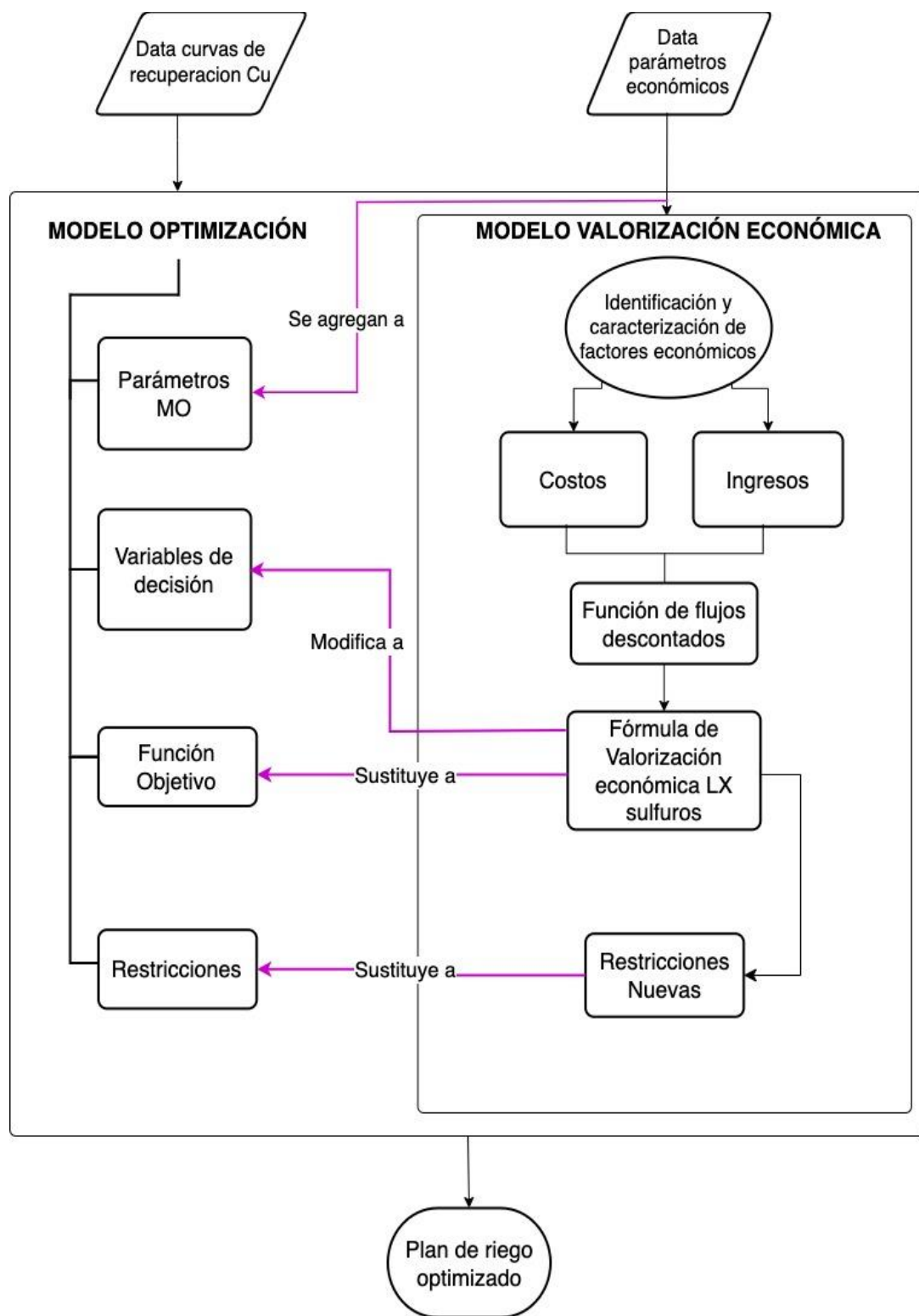


Figura 21: Esquema resumen de la metodología empleada para el desarrollo de una valorización económica y su integración en un modelo de optimización.

IV. Caso de estudio

1. Descripción escenario de estudio

1.1 Generalidades

El escenario es una biolixiviación de mineral sulfurado de cobre en una pila de mineral chancado multipiso y los detalles del mineral a lixiviar se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades del mineral a lixiviar. Fuente: Elaboración propia (2023).

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo mineral	Calcopirita	-
Ley de calcopirita equivalente	0.93	%
Ley media de cobre	0.65	%
Densidad aparente mineral	1.71	ton/m ³

La pila de lixiviación se diseñó como una pila estática, basándose en los estándares normativos pertinentes. En la Tabla 3 se presentan las características seleccionadas para el diseño y operación de la pila, relevantes para el modelo de optimización.

Tabla 3: Características de pila de lixiviación a simular. Fuente: Elaboración propia (2023).

Parámetro	Valor	Unidad
Tasa de riego	7.5	L/h/m ²
Frecuencia de riego	24	h/día
Tasa de inyección de aire	450	L/h/m ²
Angulo de reposo del material	37	°
Bermas de seguridad	15	m
Altura de piso	10	m
Número de pisos	3	-
Tasa de tratamiento objetivo	10 000	ton/día
Geometría espacio disponible	Rectangular	-

En relación con la geometría de la pila, los tres pisos tienen superficies que miden 1080 m x 600 m, 1020 m x 540 m, 960 m x 480 m, respectivamente. Se aclara que, aunque los volúmenes de los taludes se cuentan en el total por piso, estos no se consideran en la categoría de material tratable. La Figura 22 ilustra la estructura geométrica propuesta para la pila de lixiviación de estudio.

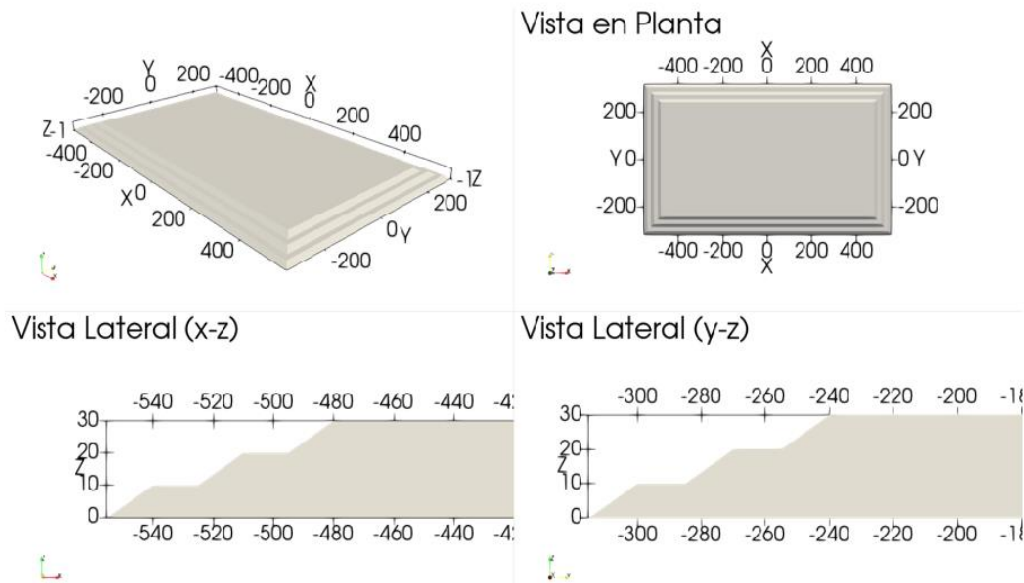


Figura 22: Vista general pila de sulfuros a estudiar.

1.2 Construcción y operación de la pila

La pila en estudio contempla un período de análisis de 150 meses, equivalente a 12.5 años. Se impuso riego en la parte superior, mientras que en la parte inferior se recoge el PLS y se fuerza la inyección de aire.

Para el modelo de optimización, la pila se divide en módulos discretos con dimensiones de 10 metros de altura y una longitud de arista en planta de 60 metros, como se ilustra en la Figura 23. Estos módulos discretos son la base para la ejecución del modelo de optimización.

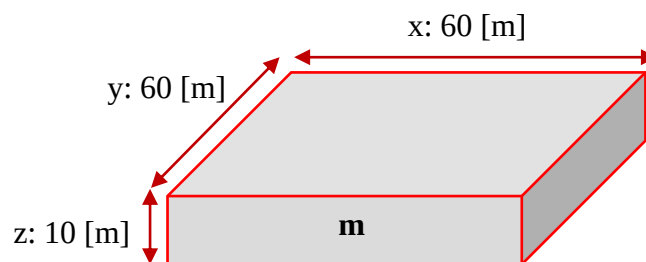


Figura 23: Geometría de un módulo de riego.

Para la construcción de la pila, se determinó una secuencia de crecimiento de la pila como se muestra en la Figura 24. Este plan de construcción considera una carga constante de material de 10.000 [ton/día] con lo que se forman plataformas de 60 m x 60 m en planta siguiendo un patrón serpenteante. Para considerar un conjunto de módulos como regables, se impuso que todos los módulos correspondientes a una sección transversal (eje y) deben estar contruidos y no debería haber mineral sobre ellos.

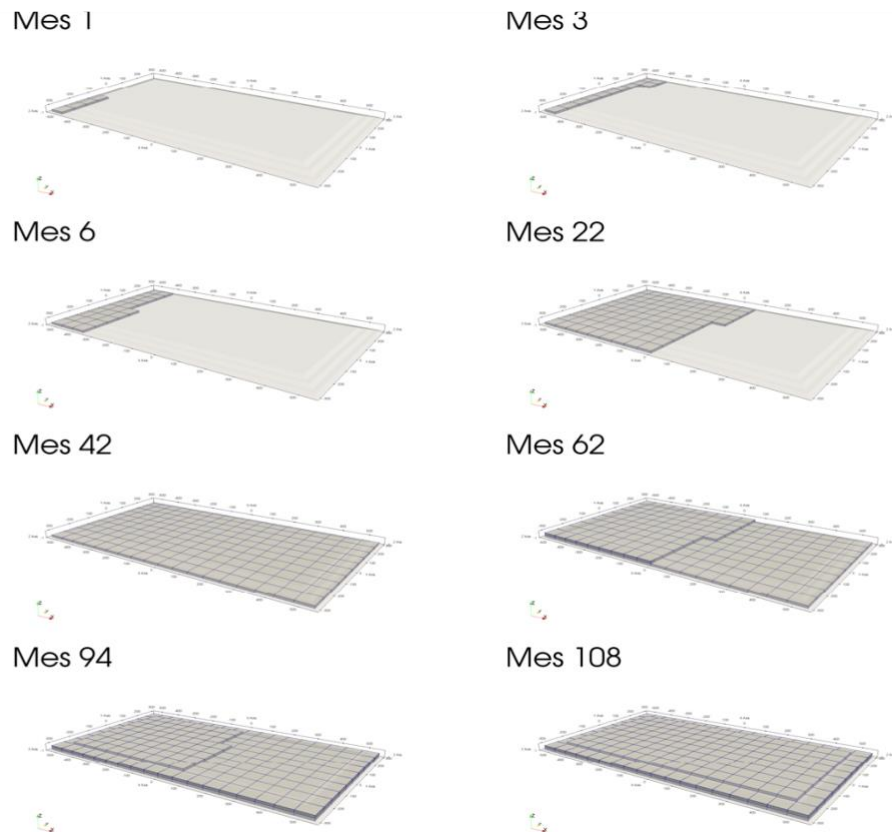


Figura 24: Patrón de construcción de módulos de optimización para la pila de lixiviación de estudio.

Con respecto al riego de la pila, los módulos se enumeran como se muestra en la Figura 25. La enumeración en el primer piso es de izquierda a derecha, partiendo del módulo 0 al 17. Luego se vuelve a enumerar en la segunda fila de izquierda a derecha, hasta completar el primer piso. La enumeración para el segundo y tercer piso respetan el mismo orden de enumeración, comenzando el segundo piso con el módulo 18 sobre el módulo 0 hasta completar el piso con el módulo 359 sobre el 179. Para el tercer piso el ejercicio es análogo. El detalle de los módulos del segundo y tercer piso se pueden ver en anexo.

162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179
144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161
126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143
108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17

Figura 25: Enumeración de módulos y áreas de riego en el primer piso de la pila de sulfuros.

Las zonas coloreadas de la Figura 25 representan áreas de riego común y también comparten la misma disponibilidad temporal del riego. Un área de riego está compuesta por 10 módulos (largo) x 1 modulo (ancho). La enumeración de las áreas de riego va de izquierda a derecha y luego se replica para los pisos superiores. En total hay 52 áreas de riego, 18 en el primer piso, 18 en el segundo piso y 16 en el tercer piso de la pila. Dado que la construcción de la pila es secuenciada, esto determinará los períodos de disponibilidad de riego para los módulos. El detalle de los periodos de disponibilidad se encuentra en la Figura 26.

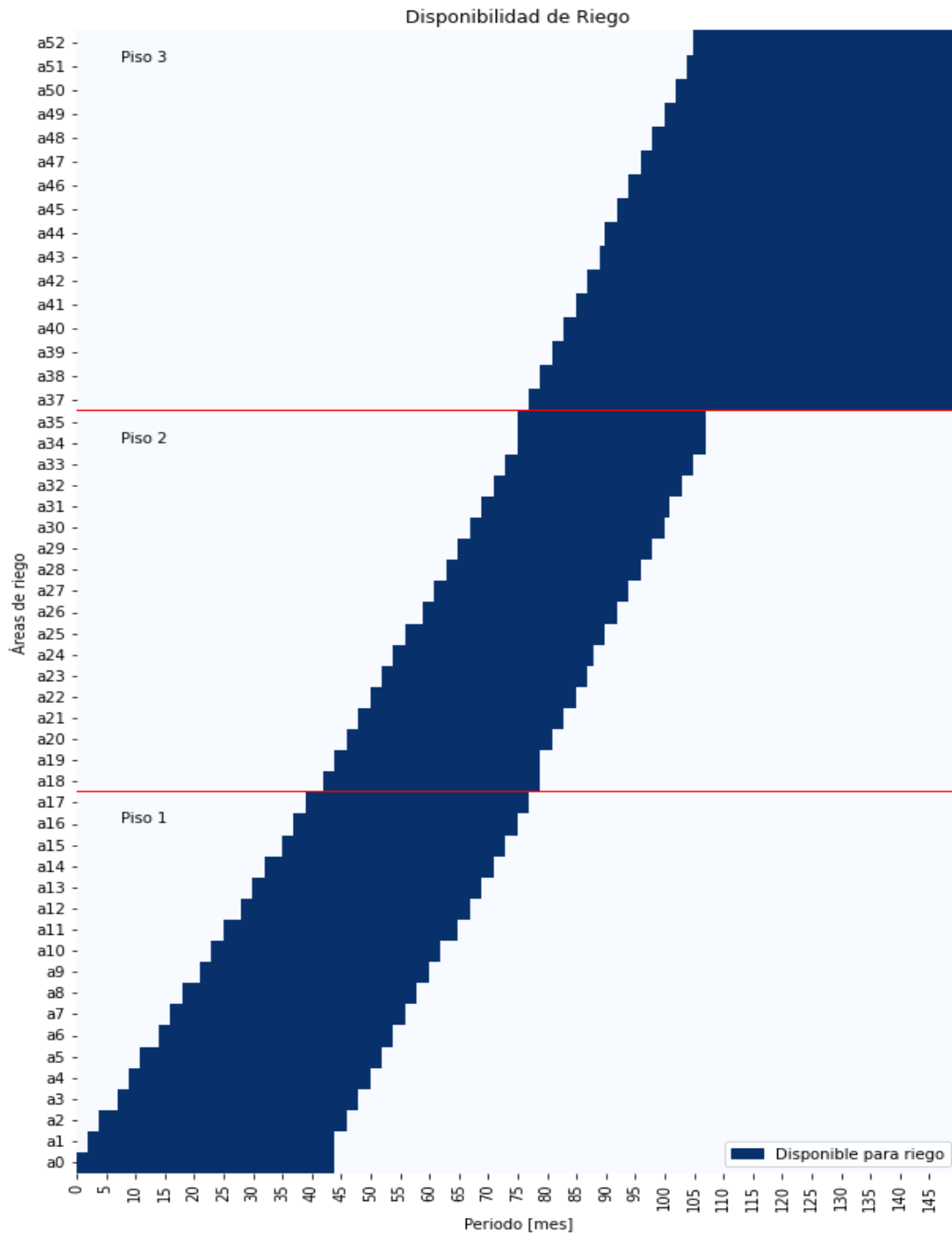


Figura 26: Disponibilidad de riego por periodos para cada área de riego definida de la pila de estudio durante todo el tiempo de análisis de 150 meses.

En la Figura 26, se observa un tramo constante a partir del área de riego 37; esto corresponde al comienzo del tercer y último piso, que, al no recibir cobertura adicional de material, permanece disponible para el riego hasta el término del periodo de análisis.

2. Simulación de escenario de referencia

Para aplicar el modelo de optimización, fueron ejecutados escenarios de referencia con el fin de obtener curvas de producción individual para cada módulo. Estas curvas son fundamentales como datos de entrada del modelo de optimización, y se generaron empleando el modelo fenomenológico. Los escenarios desarrollados consideraron la extracción completa de cobre en cada piso, con riego constante, para garantizar que el cobre recuperado proviniera únicamente del módulo irrigado. Los detalles de los resultados del modelo fenomenológico se pueden ver en anexo.

Las características del mineral y riego para la simulación con el modelo fenomenológico son las ya presentadas en la sección 1 del escenario de estudio. De esta forma se obtuvieron las curvas de producción (o recuperación) de cobre, conformando así el caso inicial de base E_0 .

3. Optimización del riego y valorización

El modelo de optimización combina las curvas de producción específicas de cada módulo con parámetros económicos y operacionales para calcular los flujos descontados que resultarían de irrigar un módulo durante un periodo determinado. De esta manera puede probar las distintas combinaciones de riego para encontrar un plan de riego que maximice la función de valorización económica desarrollada.

A continuación, se presentan en la Tabla 4 los parámetros utilizados para la valorización económica de los flujos:

Tabla 4: Parámetros del modelo de optimización para la valorización económica de los módulos que componen la pila. Sn es acrónimo de solución. Fuente: Elaboración propia (2023).

Parámetro	Valor	Unidad
Precio del cobre (P_{Cu})	3.8	USD/lb
Costo de venta PLS (costo SX y EW, C_v)	0.4	USD/lb
Eficiencia SX	96	%
Eficiencia EW	96	%
Costo Remuneraciones (C_{rem})	54	cUSD/lb
Costo Combustible (C_{comb})	9	cUSD/lb
Costo Servicios (C_{serv})	41	cUSD/lb
Costo Depreciación (C_{dep})	39	cUSD/lb
Precio unitario del ácido sulfúrico (P_{ac})	180	USD/ton _{ac}
Consumo de ácido sulfúrico ($Cons_{ac}$)	14	Kg/ton
Recirculación de ácido sulfúrico (R_{ac})	15	%
Precio unitario de la energía (P_{en})	130	USD/MWh
Eficiencia de la bomba (η_{bomba})	80	-
Cota final PLS ($cota_f$)	0	m
Pérdidas de potencia por singularidades (h_{si})	0	m

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad PLS (ρ_{PLS})	1000.00	kg m ⁻³
Densidad aire (ρ_{Aire})	1.29x10 ⁻³	kg m ⁻³
Aceleración de gravedad (g)	9.8	m/s ²
Diámetro de tubería aire (d_{tubaire})	0.3	m
Velocidad solución, PLS ($v_{\text{Sn}}, v_{\text{PLS}}$)	3	m/s
Precio unitario de agua fresca (P_{agua})	2	USD/m ³
Make-up de agua (M_{up})	0.15	m ³
Costo bacterias (C_{bact})	0.04	USD/ton
Producción máxima Cu ²⁺	2000	ton
Riego máximo Sn de riego por periodo	2500	ML
Tasa de descuento (k)	0.83 (mensual) 10 (anual)	%

Además, el modelo de optimización considera los siguientes supuestos:

- El supuesto principal es que la pila se puede discretizar en módulos que modelan su comportamiento global. Esto significa que la suma de las recuperaciones por módulo será similar al resultado de regar la pila o una sección de esta.
- Solo habrá recuperación de cobre por riego directo. Esto quiere decir que, si se riega un módulo de pisos superiores y cae ácido para reaccionar con mineral de un módulo inferior, esa recuperación no será considerada. Hay que recordar que el modelo tiene como entradas curvas de recuperación con el módulo inferior ya agotado.
- Si bien el modelo fenomenológico considera efectos de la temperatura al generar las curvas de producción de entrada, el modelo de optimización no considerará efectos de enfriamiento o calentamiento de la pila dado un determinado plan de riego.
- La tasa de riego, los costos y el precio de venta del cobre serán constantes.
- Para calcular el costo de energía, el caudal de PLS será igual al caudal de solución de riego.
- El riego se realiza de forma continua durante el periodo.
- Los módulos conforman áreas de riego. El plan para los módulos de una misma área es el mismo.
- Los módulos solo pueden ser regados cuando ya fueron construidos y no han sido cubiertos por otro.

4. Evaluación de la efectividad del modelo

4.1 Validación costos

La sección de validación de costos se enfoca en la evaluación de la exactitud del modelo de optimización aplicado a través de la comparación de la distribución de costos entre lo calculado por el modelo y los estándares proporcionados por la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). En la Tabla 5 se muestra el desglose de los valores de referencia y los calculados por el modelo a partir de la valorización económica.

Tabla 5: Distribución de costos porcentual para lixiviación según referencia industria (Cochilco) y valorización económica del modelo de optimización. Referencia: Cochilco, Caracterización de los costos de la gran minería.

Parámetro	Distribución costos referencia Cochilco	Distribución costos Valorización económica	Diferencia
Ácido sulfúrico	10%	8.3%	1.7 %
Energía eléctrica	9%	13.1 %	4.1%
Otros	81%	78.6%	2.4%
	Depreciación; Otros servicios; Remuneraciones; Combustibles; Materiales e insumos	Depreciación; Servicios a terceros; Remuneraciones; Combustibles : 77.4% Agua 1% Bacterias/Sal 0.2%	

Como se observa en la Tabla 5, la correspondencia entre los costos proyectados por el modelo y los datos de Cochilco se verifica a través de un análisis comparativo. Los valores porcentuales coinciden en orden de magnitud y las diferencias porcentuales son menores a 4.1%, lo que asegura que los costos estimados reflejan de manera coherente y realista las condiciones económicas del proceso de lixiviación.

4.2 Caso referencia: algoritmo Greedy

El propósito de desarrollar este algoritmo es establecer una metodología de riego análoga a la que implementaría un operador en una planta de lixiviación, fundamentada en un principio goloso. Este principio busca regar “lo antes posible”, basándose en un criterio de producción máxima para la elección de las áreas de riego por cada periodo.

La elección de decidir regar “lo antes posible” busca optimizar la utilización del valor económico para contrarrestar el impacto de la tasa de descuento. Además, el uso del criterio de máxima producción para priorizar las áreas de riego se aplica con el fin de dar preferencia a los módulos que poseen un mayor valor económico.

El algoritmo está diseñado para respetar las mismas restricciones operacionales establecidas en el modelo de optimización, permitiendo así generar una solución inicial viable para el problema de optimización planteado en este estudio.

4.3 Caso análisis sensibilidad

A continuación, se presentan los parámetros seleccionados para llevar a cabo el análisis de sensibilidad del modelo de optimización con valorización económica, en función del impacto económico que genere la variación de estos parámetros en los flujos descontados finales. En la Tabla 6 se presenta el rango de variación de los parámetros y los valores específicos utilizados se pueden consultar en anexo.

Tabla 6: Parámetros y sus rangos de variación para análisis de sensibilidad del modelo integrado, en función de factores económicos.

Parámetro	Rango Variación	Rango % Variación
Precio ácido [USD/ton _{ac}]	60 - 270	-67% a 50%
Precio energía [USD/MWh]	60 - 200	-54% a %54
Precio agua [USD/m ³]	1.5 – 3.0	-25% a 50%
Precio cobre [USD/lb]	2.75 - 4.50	-28% a 18%
Consumo ácido [kg _{ac} /ton]	5 – 30	-64% a 114%
Makeup agua [m ³ /ton]	0.01 - 0.21	-93% a 40%

El porcentaje de variación de cada parámetro se calcula con respecto al "caso base" indicado en la Tabla 4. Este porcentaje muestra la diferencia entre el valor a analizar y el valor de base: si es negativo, el valor analizado es menor que el de base; si es positivo, es mayor.

El rango de variación de cada parámetro fue escogido en base a los valores históricos y valores proyectados dentro de la industria minera, considerando los registros entre los años 2018 a 2030. Dentro de este análisis, se tomaron los valores extremos (mínimos y máximos) para establecer los límites inferior y superior del rango de variación, donde quedan dentro del rango todos los demás valores estudiados para este análisis. En el caso del consumo de ácido, también se consideraron distintos tipos de minerales sulfurados de cobre para la definición del rango.

El objetivo de esto es analizar casos de sensibilidad con datos representativos de la industria, lo que da lugar a un análisis mucho más cercano a la realidad a partir del modelo.

V. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos por la aplicación del esquema de optimización al caso de estudio presentado en el capítulo IV de esta investigación. Los resultados incluyen el plan de riego generado por el modelo de optimización, una comparación de los flujos descontados obtenidos por dicho modelo versus el método Greedy, y un análisis de sensibilidad que evalúa cómo las variables involucradas influyen e impactan en el rendimiento económico del modelo. Además, cada sección proporciona una discusión y análisis de estos resultados.

1. Plan de riego

En esta sección se presentan los resultados generados por el modelo de optimización, al incorporar la metodología de valorización económica para la lixiviación de sulfuros de cobre. En la Figura 27 se presenta el plan de riego durante el horizonte temporal de operación de 150 meses, usando una disponibilidad de riego $Q = 10.000 \text{ ton/d}$ y una tasa de riego $TR = 7.5 \text{ [L/h/m}^2\text{]}$.

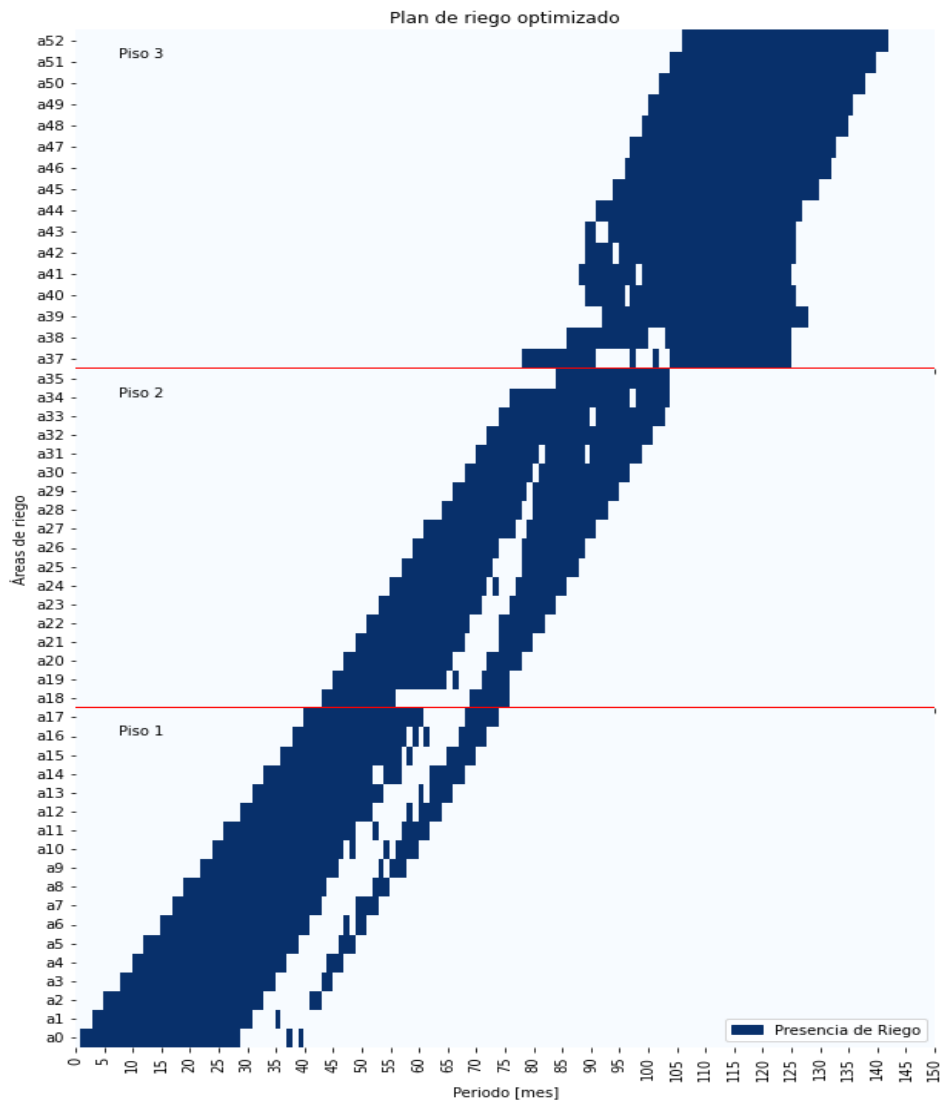


Figura 27: Plan de riego generado por modelo optimización con valorización económica para sulfuros de cobre, $Q=10.000 \text{ ton/d}$ y $TR=7.5 \text{ L/h/m}^2$, para 150 meses.

El plan de riego que se muestra en la Figura 27 fue optimizado a partir de la disponibilidad de riego presentada en la Figura 26 del capítulo IV. En la Figura 27 los colores representan la decisión de riego, para cada área y por periodo, tomada por el modelo de optimización: los tramos pintados de color azul indican los periodos en que el modelo decide regar las áreas, mientras que los tramos no pintados señalan los periodos en los que el modelo opta por no regar.

A continuación, en la Figura 28 se presenta una comparación entre el plan de riego optimizado y la disponibilidad de riego, con el fin de poder visualizar la gestión del riego ejecutada por el modelo respecto de su condición inicial.

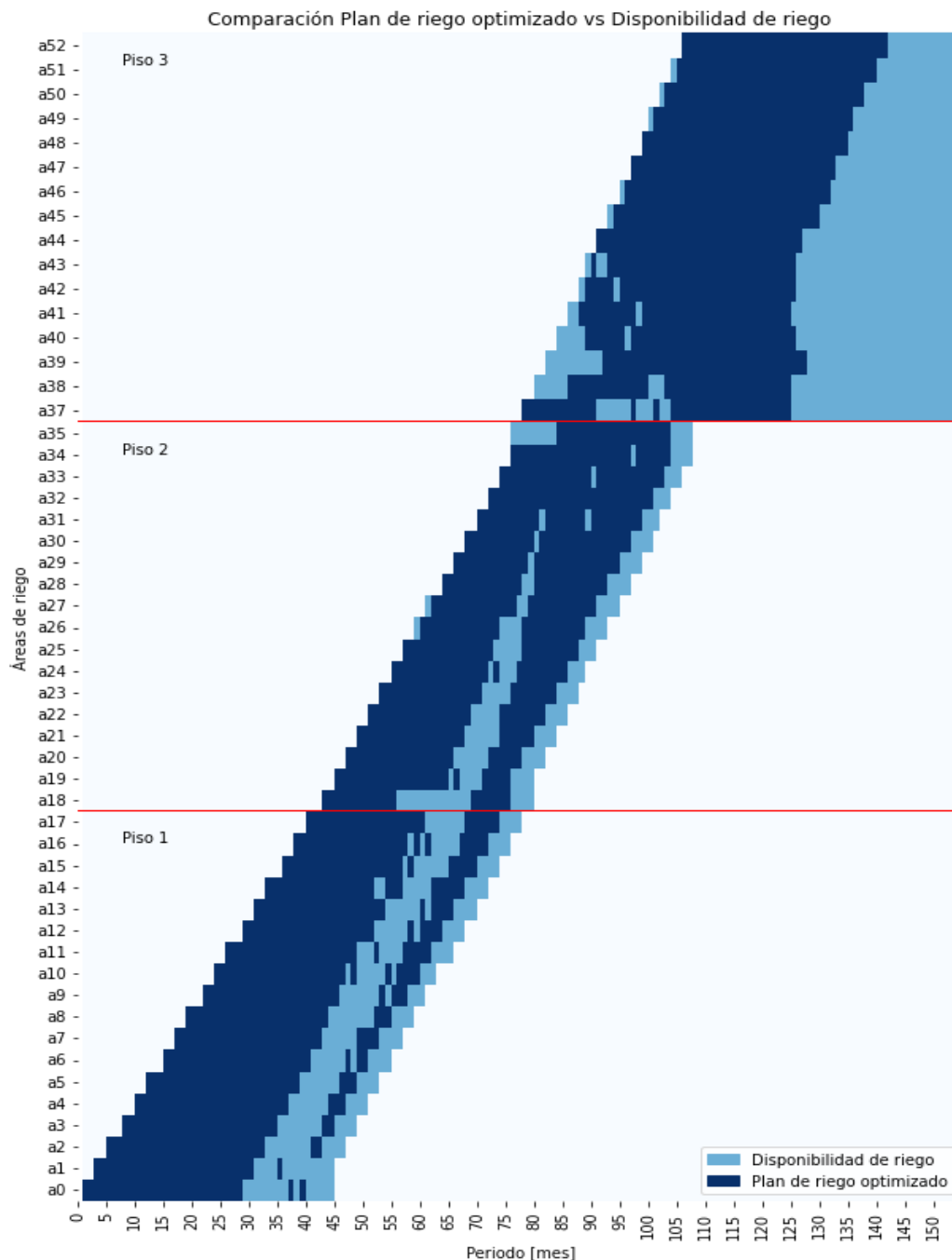


Figura 28: Comparativa de gestión del riego: Plan optimizado versus Disponibilidad inicial por pisos.

La Figura 28 se obtuvo mediante la superposición del plan de riego optimizado (azul) obtenido por el modelo sobre la disponibilidad de riego en celeste (es importante aclarar que parte de la disponibilidad de riego queda oculta bajo el color azul, sin embargo, esta abarca todos los periodos con color). De esta manera, los tramos pintados de color azul son aquellos periodos en los cuales el modelo de optimización decide regar. Por otro lado, los tramos de color celeste son aquellos periodos que, estando disponibles, el modelo decide no regar.

Además, en las figuras se observan tres secciones que representan los tres pisos de la pila de lixiviación, los cuales tienen demarcados sus límites mediante líneas horizontales rojas.

Análisis y discusión

A partir del análisis de la Figura 28 se observa lo siguiente:

Piso 1: En general, para todas las áreas que lo componen ($a_0 - a_{17}$), el modelo sigue un patrón de riego similar: riega en promedio durante los primeros 30 meses de forma continua, luego decide no regar durante 8 a 10 meses. Posteriormente reanuda el riego durante un periodo menor al anterior y finaliza con la decisión de no regar en los últimos meses de su disponibilidad.

Piso 2: Se da un comportamiento similar entre las áreas de riego a_{19} y a_{26} , donde el modelo decide no regar durante un promedio de 5 meses en el punto medio del período de disponibilidad de cada área mencionada. Respecto de las otras áreas, se observa un periodo sin riego en el área a_{18} de 15 meses, uno de 7 meses para el área a_{35} e intermitencias entre 1 a 3 meses de no riego en las áreas restantes. Al igual que en el primer piso, el modelo decide no regar los últimos meses de disponibilidad por área.

Piso 3: Se observan las decisiones del optimizador de omitir el riego solamente entre las áreas a_{37} y a_{43} en breves periodos de tiempo, sin patrones similares. Adicionalmente, el modelo corta el riego desde el mes 125 para el área a_{37} y desde el mes 143 para el área a_{52} , manteniéndose la decisión observada en los pisos anteriores de no regar los últimos meses del periodo de disponibilidad en todas las áreas de riego.

En general, el plan de riego generado por el modelo de optimización con criterio de valorización económica desarrollado en este estudio muestra un desempeño satisfactorio debido a los siguientes factores:

- El modelo efectivamente ajusta sus decisiones de riego y no riego de acuerdo con la disponibilidad inicial establecida, sin presentar inconsistencias en relación con estos límites.
- Se identifican diversas decisiones de riego en cada nivel del plan, indicando que el modelo gestiona el riego durante toda la operación de la pila. Esto sugiere que el modelo gestiona al largo plazo.
- El hecho de que el modelo decida no regar los últimos meses del periodo de disponibilidad durante todo el plan de riego y para los tres pisos de la pila sugiere que el modelo gestiona el recurso privilegiando comenzar a regar un área nueva en vez de seguir regando las áreas que ya estaban siendo regadas. De esta manera, privilegia maximizar las ganancias asociadas y no solo la recuperación

de cobre, ya que el valor económico de un área aún no regada es mayor que el de un área que ya está siendo agotada.

Por último, es importante mencionar que, aunque el modelo demuestra una efectiva gestión del riego para generar el plan optimizado, este presenta una limitación relacionada con los datos de entrada de la recuperación de cobre, ya que toma como *input* una curva de recuperación que se vuelve estática para todo el horizonte de planificación. Esto puede generar que el modelo disminuya su rendimiento de optimización al no considerar la variabilidad propia del proceso de lixiviación, lo que podría entregar un plan de riego que no sea completamente óptimo para las condiciones operativas reales.

2. Comparación con método Greedy

En esta sección se presentan los resultados generados por el modelo de optimización y la metodología greedy, con el fin de comparar el resultado de cada método para la optimización del riego en las mismas condiciones de operación.

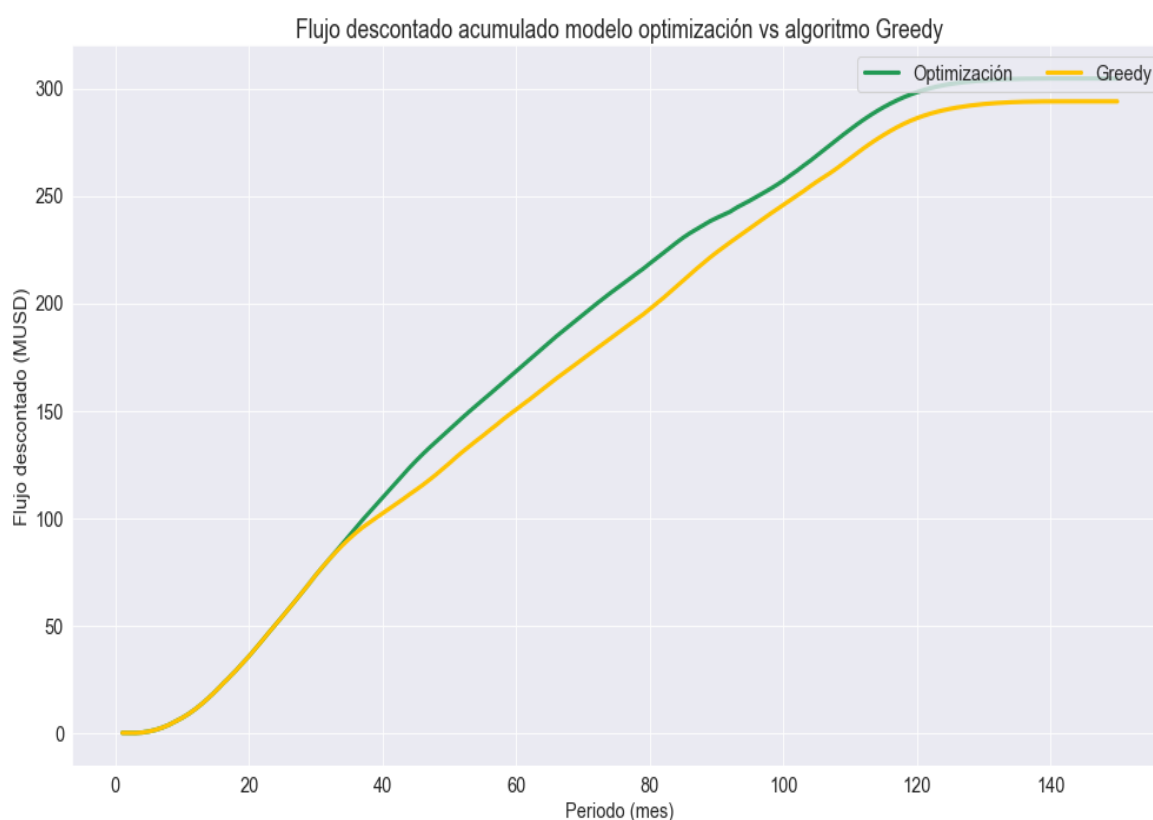


Gráfico 1: Flujo descontado acumulado modelo optimización vs algoritmo greedy.

En el Gráfico 1 se presentan las curvas del flujo descontado acumulado según cada metodología de cálculo y el plan utilizado (optimizado o greedy). El detalle de los totales de las curvas de producción y flujo descontado según cada modelo se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Comparación de resultados de la optimización en el riego según metodología de modelo optimización versus método greedy.

Parámetro	Estimación optimización		Diferencia optimización (Ganancia)	Diferencia porcentual (Ganancia)
	Plan Modelo Optimización	Plan Greedy		
Flujo descontado acumulado [MUSD]	302.56	291.75	10.82	3.71 %
Producción [kton]	83.97	82.62	1.35	1.63%

Análisis y discusión

En el Gráfico 1 se observa que ambas curvas tienen un comportamiento similar en forma de S, dada la naturaleza acumulativa de los datos representados. Ambas curvas inician con una pendiente pronunciada, indicando una rápida acumulación inicial de flujo descontado y tienden a aplanarse a medida que se acercan al mes 140, donde el beneficio económico asociado a la extracción del cobre deja de crecer.

Por otro lado, se observan diferencias entre las curvas de cada metodología, según avanza en el tiempo. Así, durante los primeros 35 meses aproximadamente, la superposición de las curvas de optimización y greedy muestra que ambas metodologías producen un flujo descontado acumulado idéntico. Esto implica que la eficiencia en la acumulación de flujo descontado se comporta igual entre los dos enfoques durante esta fase inicial. Además, la coincidencia en la acumulación del flujo descontado sugiere que las decisiones para optimizar el riego que toman tanto el modelo de optimización y greedy en este periodo sean muy similares.

Luego, después de los 35 meses, se observa que la curva de optimización comienza a divergir de la curva Greedy, permaneciendo durante todo el horizonte temporal de riego por sobre la curva Greedy. El hecho de que la curva de optimización permanezca constantemente por encima de la curva Greedy después del punto de divergencia indica que el modelo de optimización está identificando y aprovechando mejor los recursos para el riego a mediano y largo plazo.

En las etapas finales del gráfico, ambas curvas se aplanan y se aproximan a una meseta cercana a los 300 MUSD, donde la curva de optimización está sobre este valor y la curva greedy bajo dicho valor. En efecto, como se observa en la Tabla 7 el flujo descontado obtenido con el plan optimizado es de 302.56 MUSD y el generado por el plan greedy es de 291.75 MUSD.

En la Tabla 7 los resultados muestran que el plan optimizado acumula un mayor flujo descontado que el plan greedy, con una diferencia de 10.82 MUSD de ganancia, es decir el plan optimizado genera 10.82 MUSD más que el plan greedy. Esta ganancia representa un 3.71% de diferencia entre el flujo descontado generado por una metodología y otra. Además, en dicha tabla se presentan los resultados de cobre total producido por las dos metodologías en comparación. Se observa que el plan del modelo

de optimización supera al plan greedy en 1.35 [kton], valor que representa un 1.63% de ganancia a favor del plan optimizado. En consecuencia, el modelo de optimización supera al enfoque greedy en términos de flujo descontado acumulado y producción total de cobre.

Al considerar el análisis del Gráfico 1 y la Tabla 7, se observa que mientras que inicialmente ambas metodologías pueden tomar decisiones similares, con el tiempo, el modelo de optimización comienza a tomar decisiones que maximizan el flujo descontado de manera más efectiva en comparación con el enfoque Greedy. Dado que las curvas son idénticas en la fase inicial, la diferencia en el flujo descontado acumulado obtenido se debe a las decisiones tomadas después del punto de divergencia (35 meses aproximadamente). Este comportamiento sugiere que la metodología de optimización no solo iguala al enfoque Greedy en el corto plazo, sino que también ofrece ventajas adicionales a medida que el tiempo avanza, traducidas en ganancias. Esto tiene relación con que el plan optimizado tiene como objetivo maximizar el beneficio económico a lo largo de todo el horizonte de planificación, garantizando que el proceso se realiza de la mejor manera posible, a diferencia del algoritmo greedy que va tomando la mejor decisión periodo a periodo, lo que no necesariamente garantiza que sea la mejor estrategia a largo plazo.

Finalmente, en el contexto del uso de la metodología greedy para reflejar una operación real, el método del modelo de optimización presenta una ventaja significativa en cuanto al tiempo de cómputo, ya que entrega un plan de riego de forma automatizada en un tiempo mucho menor que el procedimiento manual realizado por operadores, el cual es considerablemente más laborioso y prolongado. Esto representa un gran aporte de la metodología para la asistencia de la operación minera, facilitando la toma de decisiones al estar parametrizado y permitiendo la evaluación de distintos casos.

3. Análisis de sensibilidad

Para evaluar el impacto de las variables económicas más relevantes del modelo de optimización en el valor de los flujos descontados, se corrió el modelo variando los siguientes parámetros: precio ácido sulfúrico; precio energía; precio agua fresca; precio cobre; consumo de ácido sulfúrico y *make up* de agua fresca. Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 2.

El Gráfico 2 muestra una línea horizontal discontinua que representa el flujo descontado acumulado del modelo de optimización en su estado base, sin cambios en las variables analizadas. Las líneas continuas, en cambio, muestran las fluctuaciones de cada variable económica dentro de sus rangos establecidos de variación porcentual. Cada punto en estas líneas corresponde al flujo descontado acumulado obtenido a partir de las simulaciones del modelo con distintos valores de cada parámetro.

Hay que entender que el comportamiento de cada curva de línea continua con respecto a la recta "Flujo descontado caso base" refleja como los cambios en el valor de la variable estudiada influyen en los resultados del flujo descontado. Además, los rangos en los que variaron los parámetros se establecieron según criterios específicos para cada uno considerando valores históricos, proyecciones y factores operacionales; por esta razón las variaciones no son completamente simétricas.

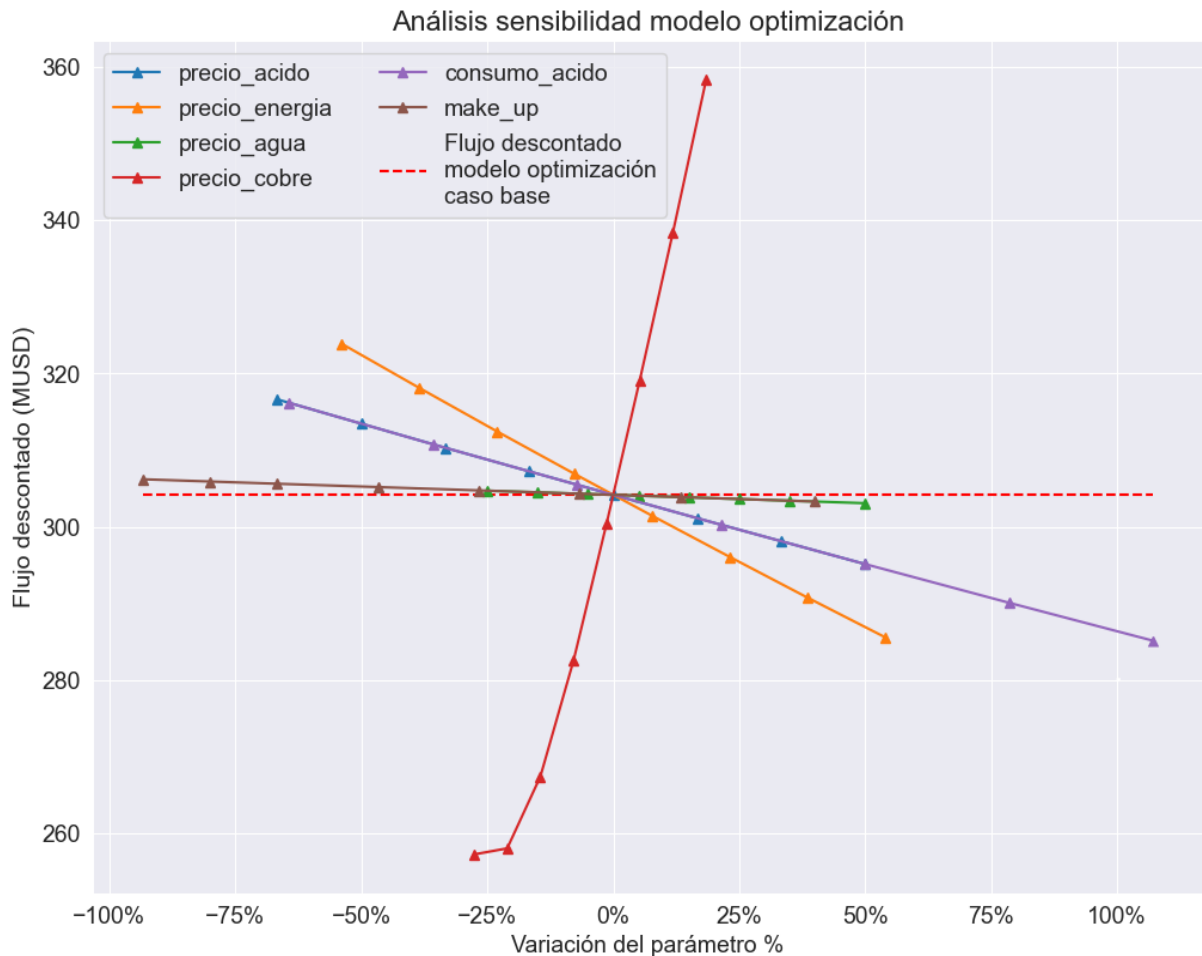


Gráfico 2: Análisis de sensibilidad de seis parámetros para el modelo de optimización. En el eje horizontal, se presenta la variación porcentual de cada parámetro, que oscila entre una disminución del 100% y un aumento del 100%. El eje vertical cuantifica el flujo descontado acumulado en millones de dólares para cada caso analizado.

Análisis y discusión

Para analizar el comportamiento de estas curvas, dado que muestran una tendencia lineal, se consideran dos aspectos principales de la pendiente:

- *Sentido de la pendiente:* Una pendiente positiva o ascendente indica que un incremento en el valor de la variable conduce a un aumento en los flujos descontados. Por el contrario, una pendiente negativa o descendente indica que un aumento en el valor de la variable reduce los flujos descontados.
- *Inclinación de la pendiente respecto al flujo descontado base:* determina el grado de influencia de la variable sobre los flujos descontados. Una inclinación pronunciada implica un impacto significativo, mientras que una inclinación cercana a la horizontal indica un impacto menor.

El análisis específico del comportamiento de cada curva se describe a continuación:

- **Precio ácido (azul):** Esta curva muestra una pendiente negativa en comparación con el caso base, indicando que un aumento en el precio del ácido (variación porcentual positiva) reduce los flujos descontados y viceversa. La inclinación pronunciada de la

curva refleja un nivel de impacto relevante de considerar para la rentabilidad del plan de riego en la lixiviación generado por el modelo de optimización.

En cuanto al rango de variación, se observa una tendencia hacia la baja en los precios del ácido, debido a que, en los años 2021 y 2022, el precio subió abruptamente y alcanzó un máximo histórico. Actualmente, esta situación se está estabilizando y se proyecta una disminución en los precios en los próximos años.

- Precio energía (amarillo): la curva de esta variable también es negativa, por lo que, a mayor precio de la energía, disminuyen los flujos descontados. La pendiente tiene una mayor inclinación que la del ácido, por lo que los cambios en esta variable impactan de forma importante en el modelo y en mayor medida que el ácido sulfúrico.

En este caso, el rango de variación del precio de la energía es más simétrico debido a su dependencia de múltiples variables externas, incluyendo fuentes renovables, planes de descarbonización de la matriz energética y sistemas de almacenamiento, entre otros factores.

- Precio agua fresca (verde): esta variable también presenta una pendiente negativa, aunque con un grado de inclinación leve, lo que implica que aumentos en el precio del agua disminuyen los flujos descontados, pero con un efecto bastante menor en comparación con el ácido y la energía.

Su rango de variación tiene que ver con que se espera un aumento en los costos del agua fresca debido a la crisis hídrica y el mayor costo asociado al uso de nuevas tecnologías como la desalinización, factores que están presionando los precios hacia arriba.

- Precio cobre (rojo): esta curva es la única que presenta una pendiente positiva, indicando que un aumento en el precio del cobre eleva los flujos descontados. Su impacto es muy significativo, ya que tiene una inclinación muy elevada y cercana a la vertical, mucho mayor que las otras variables de análisis. Esta relación evidencia la dependencia directa de los ingresos del proceso de lixiviación en los precios de mercado del cobre.

En cuanto al rango de variación, este es más simétrico debido a la tendencia volátil del precio del cobre influenciada por factores económicos globales.

- Consumo ácido (morado): la curva muestra una pendiente negativa, con un grado de inclinación muy similar al precio del ácido, lo que hace suponer que estos impactan a los flujos descontados en un nivel muy similar. Un aumento en el consumo de ácido sulfúrico resulta en una disminución de los flujos, resaltando la importancia de la eficiencia en su uso.

En este caso, el rango de variación del consumo se extiende a valores mayores, una tendencia relacionada con la disminución de la ley de los minerales de cobre, que requieren un mayor consumo de ácido sulfúrico para su procesamiento. Aunque esta tendencia al aumento es notable, no es completamente asimétrica debido a que

factores como la eficiencia operacional también influyen, y estos han sido considerados en la definición del rango.

- *Makeup* de agua (marrón): Esta variable muestra una pendiente negativa, indicando que un mayor requerimiento de agua fresca para reemplazar las pérdidas en el sistema (*makeup* de agua) reduce los flujos descontados. La suave inclinación de su pendiente es muy cercana a la del precio del agua, reflejando un grado de impacto similar y de menor magnitud en comparación con las otras variables.

El rango de variación muestra una tendencia hacia la reducción del *makeup* de agua, lo cual se alinea con los planes y metas nacionales e industriales que buscan una gestión más eficiente del agua. Esta tendencia responde a los esfuerzos por disminuir el uso del agua y la implementación de nuevas tecnologías y mejores procesos que permitan un consumo hídrico más eficaz.

En consecuencia con lo anterior, los resultados demuestran que el modelo es altamente sensible al precio del cobre, con una correlación positiva significativa, lo cual es esperado dado que el cobre constituye el principal producto de venta en el modelo económico analizado.

Respecto a la sensibilidad del modelo frente a los insumos, se evidencia que todas las variables afectan inversamente los flujos descontados. El agua, cuyo precio y *makeup* tienen un impacto similar, genera el menor efecto sobre los flujos descontados. Esta menor sensibilidad se atribuye a una gestión eficiente actual que incorpora recirculaciones y tratamiento en las operaciones, mitigando el impacto de las variaciones del agua.

Las variables asociadas al ácido sulfúrico ocupan el segundo lugar en términos de impacto. Tanto el precio como el consumo de ácido afectan de manera similar y significativa los flujos descontados, con un impacto considerablemente mayor que el del agua. La importancia del ácido sulfúrico en los procesos de lixiviación, donde su demanda y precio están directamente relacionados con la eficiencia operativa y los costos de producción, hace crítica su gestión eficiente. Por lo tanto, la optimización del consumo y la gestión de costos del ácido son esenciales para mejorar la rentabilidad del proyecto.

El precio de la energía es la variable de insumo que más influye en los flujos descontados, con un impacto aproximadamente del doble que el del ácido sulfúrico. La notable sensibilidad a las variaciones en el precio de la energía resalta la importancia de implementar estrategias de eficiencia energética en las operaciones.

Finalmente, el análisis previo del rango de variabilidad de estas variables permite visualizar escenarios representativos del pasado y proyectar futuros posibles en la industria.

VI. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se aborda el problema de integración de un modelo de valorización económica en la generación de un plan de riego óptimo para pilas de lixiviación en sulfuros de cobre. La motivación de este trabajo proviene de un desarrollo inicial de Silva (2022), quien desarrolló un modelo de decisión para regar pilas de lixiviación para el caso de minerales oxidados, con el objetivo de maximizar la recuperación de cobre. Una de las limitantes de este trabajo es que no aborda el caso de lixiviación de sulfuros de cobre, uno de los temas de interés clave para el futuro de la minería. Por otro lado, no incorpora un criterio económico en las decisiones de riego, ya que no considera los costos y la disponibilidad de insumos críticos asociados al proceso. En la búsqueda por generar estrategias que resuelvan estas limitaciones se dio origen a este trabajo de título.

Para ello, se desarrolló una metodología de valorización económica que incorpora elementos esenciales para modelar la operación. El análisis de documentación práctica y resultados operacionales de la industria permitió identificar los factores económicos clave que influyen en los costos e ingresos del proceso de lixiviación en pilas. Para el procesamiento de minerales sulfurados de cobre, se incluyeron factores asociados a la biolixiviación y la lixiviación en ambiente clorurado, ampliando el alcance del modelo y proporcionando flexibilidad mediante parametrización.

El desarrollo de la valorización permitió determinar el valor económico del plan de riego, añadiendo información valiosa. El plan de riego generado muestra resultados efectivos de la aplicación de criterios económicos, ya que prioriza áreas con mayor valor económico para maximizar las ganancias. Esto resultó en un valor acumulado del flujo de caja descontado de 302.56 MUSD.

La efectividad del modelo se evaluó mediante simulaciones. Primero, se demostró la exactitud de la valorización en la estimación de costos, con diferencias porcentuales menores al 4.1% respecto a la referencia de la industria. Segundo, comparando la metodología del modelo de optimización con una estrategia greedy, el modelo incrementó en 10.43 MUSD el beneficio económico, destacando la capacidad del modelo, que está diseñado para garantizar la toma de decisiones de la mejor manera posible, presentando un mayor rendimiento a mediano y largo plazo. Además, frente a una metodología operacional manual, el modelo ofrece la ventaja de entregar un plan de riego automatizado en un tiempo de cómputo significativamente menor. Tercero, un análisis de sensibilidad confirmó el impacto crítico del precio del cobre sobre el beneficio económico de la operación, seguido por el precio de la energía y el costo del ácido sulfúrico. Este análisis facilita la planificación y ejecución de estrategias de gestión más efectivas, centrándose en los recursos de energía y ácido sulfúrico.

A pesar de los resultados efectivos, existen limitaciones. En relación al desarrollo de la valorización, una limitación fue la disponibilidad de información, ya que la falta de algunos datos impidió un modelamiento más detallado, particularmente de los costos asociados. Por otro lado, una de las principales limitaciones presentes en todas las etapas del proyecto que contiene el desarrollo de este trabajo fue asumir condiciones ideales que en la práctica pueden no ocurrir, limitando a los modelos y sus resultados. En particular, para el modelo de optimización y la generación del plan de riego óptimo,

asumir como dato de entrada una curva de recuperación de cobre sin variabilidad genera una rigidez en la información usada por el modelo para la toma de decisiones de riego, lo que puede generar un plan de riego que subestime o sobrestime la recuperación de cobre y los flujos descontados de la operación. Sin embargo, es importante mencionar que la valorización y el modelo integrado permiten integrar la variabilidad al estar parametrizados.

Se recomienda que futuras investigaciones puedan profundizar ecuaciones para mejorar la optimización de los flujos de caja descontados, aprovechando una aplicación práctica del modelo para mejorar la base de datos disponible y facilitar análisis más profundos. Además, sería beneficioso explorar adaptaciones de la valorización económica para otros tipos de lixiviación en pilas de sulfuros de cobre, como procesos que utilicen agua de mar o métodos combinados. Por otro lado, trabajos futuros podrían abordar la variabilidad de las condiciones ideales asumidas, especialmente la información sobre la recuperación de cobre, o incluir condiciones como la recuperación indirecta, la tasa de riego variable, los flujos horizontales y los costos del cobre y de las bacterias.

En conclusión, este trabajo demuestra que la incorporación de la valorización económica refina el modelo de optimización existente, ampliando su alcance, abordando la lixiviación de sulfuros de cobre, adaptándose a diversas condiciones operacionales y mejorando la toma de decisiones. La aplicación de criterios económicos en la gestión del riego de pilas de lixiviación alinea la planificación con los objetivos mineros, promoviendo una minería sostenible y viable. A nivel macro, la herramienta de planificación integrada ofrece un significativo e innovador aporte asistiendo a los procesos mineros, siendo aplicable a las operaciones de lixiviación en pilas y sirviendo como base para futuros trabajos de este nuevo enfoque.

Finalmente, aún existen numerosas oportunidades de mejora y este trabajo representa un primer esfuerzo en la búsqueda del desarrollo de herramientas que asistan a las y los ingenieros en la generación de planes de riego que capturen el máximo valor y potencial de sus operaciones.

Referencias bibliográficas

- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2021). *Anuario de la minería de Chile 2021*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Comisión Chilena del Cobre. (2017). *Sulfuros primarios: Desafíos y oportunidades*. Santiago de Chile: Cochilco.
- Marsden, J. O., & Botz, M. M. (2017). Heap leach modeling - A review of approaches to metal production forecasting. *Minerals & Metallurgical Processing*, 34(2), 53-64.
- McBride, D., Cross, M., & Gebhardt, J. E. (2012). Heap leach modeling employing CFD technology: A 'process' heap model. *Minerals Engineering*, 72-79.
- Cai, L. (2016). CFD Modelling of Chalcopyrite Heap Leaching. *A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy*. Imperial College London.
- López, E. (2012). Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación. *Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Ingeniería Geotécnica*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Ghorbani, Y., Franzidis, J. P., & Petersen, J. (2016). Heap leaching technology - Current State, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37(2), 73-119.
- Ruiz, M. C. (2013). *Hidrometalurgia*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones* (1ª edición ed.). Santiago de Chile: Andros Impresiones Ltda.
- Corporación Alta Ley. (2019). *Roadmap 2.0 de la minería chilena*. Santiago de Chile: Corporación Alta Ley.
- Larenas, J. M. (2013). Innovación para reducir la brecha entre hidrometalurgia y flotación-fundición-refinación. *Tesis para optar al grado de magister en gestión y dirección de empresas*. Santiago de Chile.
- Bennett, C., McBride, D., Cross, M., & Gebhardt, J. (2012). A comprehensive model for copper sulphide heap leaching. *Hydrometallurgy*, 127-128, 150-161.
- Astorga Delgadillo, C. J., Cantu Treviño, J., Cuellar Romo, N. H., & Serrano Rolon, G. L. (2000). *Matemáticas para negocios*. Mexico: Blanca y Comercio.
- Castro, J. L. (2019). Análisis y aplicación del método de evaluación económica de proyectos por opciones reales. *Tesis para optar al grado de magister en gestión de empresas*. Santiago de Chile.
- McBride, D., Gebhardt, J., Croft, N., & Cross, M. (2018). Heap leaching: Modelling and forecasting using CFD technology. *Minerals*, 8(1), 9.
- Padilla, G., Cisternas, L., & Cueto, J. (2008). On the optimization of heap leaching. *Minerals Engineering*, 21(9), 673-678.
- Mellado, M., Galvez, E., & Cisternas, L. (2011). On the optimization of flow rates on copper heap leaching operations. *International Journal of Mineral Processing*, 101(1-4), 75-80.
- Saldaña, M., Toro, N., Castillo, J., Hernandez, P., & Navarra, A. (2019). Optimization of the heap leaching process through changes in modes of operation and discrete event simulation. *Minerals*, 9(7), 421.
- Trujillo, J., Cisternas, L., Galvez, E., & Mellado, M. (2014). Optimal design and planning of heap leaching process. Application to copper oxide leaching. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(2), 308-317.

- Hernandez, I., Ordoñez, J., Robles, P., Galvez, E., & Cisternas, L. (2017). A methodology for design and operation of heap leaching systems. *Mineral processing and extractive metallurgy review*, 38(3), 180-192.
- IntelliSense.io. (2022). Obtenido de Sitio Web de IntelliSense.io: <https://www.intellisense.io/>
- Duhovit. (2022). Obtenido de Sitio Web de Duhovit: <https://duhovitingenieria.cl/smartpls-2>
- ElementProcess. (2022). Obtenido de Sitio Web de ElementProcess: <https://elementprocess.com.au/heapsmart/>
- Forte Dynamics. (2022). Obtenido de Sitio Web de Forte Dynamics: <https://www.fortedynamics.com/leaching-solution-wells>
- Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper* (5ª edición ed.). Elsevier.
- Zepeda Alvarez, V. (2018). Biolixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley. *Tesis doctoral*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Beckel, J. (2000). *El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile*. Comisión Económica para América Latina, Naciones Unidas, División de Desarrollo Productiva y Empresarial. Santiago de Chile: CEPAL.
- Dutrizac. (1978).
- Moncada, M. A. (2017). Lixiviación de sulfuros de cobre: Aspectos físicos, químicos y biológicos. *Universidad de Chile*.
- Sandeep, P., Ata, A., Nilopata, P., & Haci Deveci. (2015). Current scenario of chalcopyrite bioleaching: A review on the recent advances to its heap-leach technology. *Bioresource Technology*, 196, 694-706.
- Johnson, D. B. (2018). The Evolution, Current Status, and Future Prospects of Using Biotechnologies in the Mineral Extraction and Metal Recovery Sectors. *Minerals*, 8(8), 343.
- Martinez-Bellange, P., Von Bernath, D., Navarro, C. A., & Jerez, C. A. (2021). Biomining of metals: new challenges for the next 15 years. *Microbial Biotechnology*, 15(1), 186-188.
- Li, M., & Wen, J. (2021). Recent progress in the application of omics technologies in the study of bio-mining microorganisms from extreme environments. *Microb Cell Fact*, 20, 178.
- Biomining: Metal Recovery from Ores with Microorganisms. (2013). *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 141.
- Ipinza, J. (2013). Experiencias de uso de agua de mar en hidrometalurgia. *La mediana minería en el año de la innovación*. Santiago: SONAMI & EDITEC.
- Centro Nacional de Pilotaje, UC y UTFSM. (2 de Diciembre de 2021). *Preparan guía de lixiviación clorurada para la minería*. Obtenido de Centro Nacional de Pilotaje de Tecnologías para la minería: www.pilotaje.cl
- Ipinza, J. (2020). Recorrido Histórico de la Lixiviación de Minerales de Cobre. *Lixiviación de Minerales de Cobre con sales de cloruro*. IMetChile.
- Li, J., Yang, H., Tong, L., & Sand, W. (2021). Some aspects of industrial heap bioleaching technology: from basics to practice. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(4), 510-528.
- Codelco. (2019). *Lixiviación "El riego"*. Chile: Codelco.
- Estay, H. (26 de Septiembre de 2022). AMTC presenta herramienta de predicción de producción en procesos de lixiviación en pilas de sulfuros. (R. De la Paz, Entrevistador)

- Silva, J. (2022). Evaluación de un modelo de optimización para el problema del riego en pilas de lixiviación. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Matemático*. Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Ibáñez, T., & Velásquez, L. (2013). The dissolution of chalcopyrite in chloride media. *Revista de Metalurgia*, 49(2), 131-144.
- Comisión Chilena del Cobre. (2022). Proyección de la producción de cobre en Chile 2022-2033. COCHILCO.
- Bosecker, K. (July de 1997). Bioleaching: metal solubilization by microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, 20(3-4), 591-604.
- Petersen, J. (2016). Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores: A brief overview. *Hydrometallurgy*, 165, 206-212.
- Codelco. (s.f.). *Codelco Edulca*. Obtenido de Codelco Edulca: <https://www.codelcoeduca.cl/>
- Chking. (2021). *Chking Expertos En Hidrometalurgia y Soluciones En Minería*. Obtenido de Sitio web de Chking: <https://imetchile.cl/>

Anexo

A. Complementos y consideraciones de la configuración de la pila de lixiviación

En la Tabla 8 se presentan las masas y volúmenes de material. Los tonelajes correspondientes a los taludes son considerados en el total por piso, pero no en el tratable.

Tabla 8: Dimensiones y volúmenes de pila de lixiviación, caso sulfuros de cobre.

Piso		Largo corona m	Largo base m	Volumen piso Mm ³	Masa piso Mton	Volumen tratable Mm ³	Masa tratable Mton
1	x	1080	1140	7,0	11,7	6,5	10,8
	y	600	660				
2	x	1020	1080	6,0	10,0	5,5	9,2
	y	540	600				
3	x	960	1020	5,1	8,4	4,6	7,7
	y	480	540				
Total				18,1	30,2	16,6	27,7

En cuanto al dominio para la ejecución del modelo fenomenológico, se consideró una malla regular con elementos de 2.5 m de alto y arista de 30 m en planta (el modelo de optimización usa elementos discretos de 10 m x 60 m. La relación entre los elementos discretos del modelo fenomenológico y del modelo de optimización (módulos) se presentan en la Figura 29. Cabe mencionar que para ambos modelos se excluye el material presente en taludes en los cálculos.

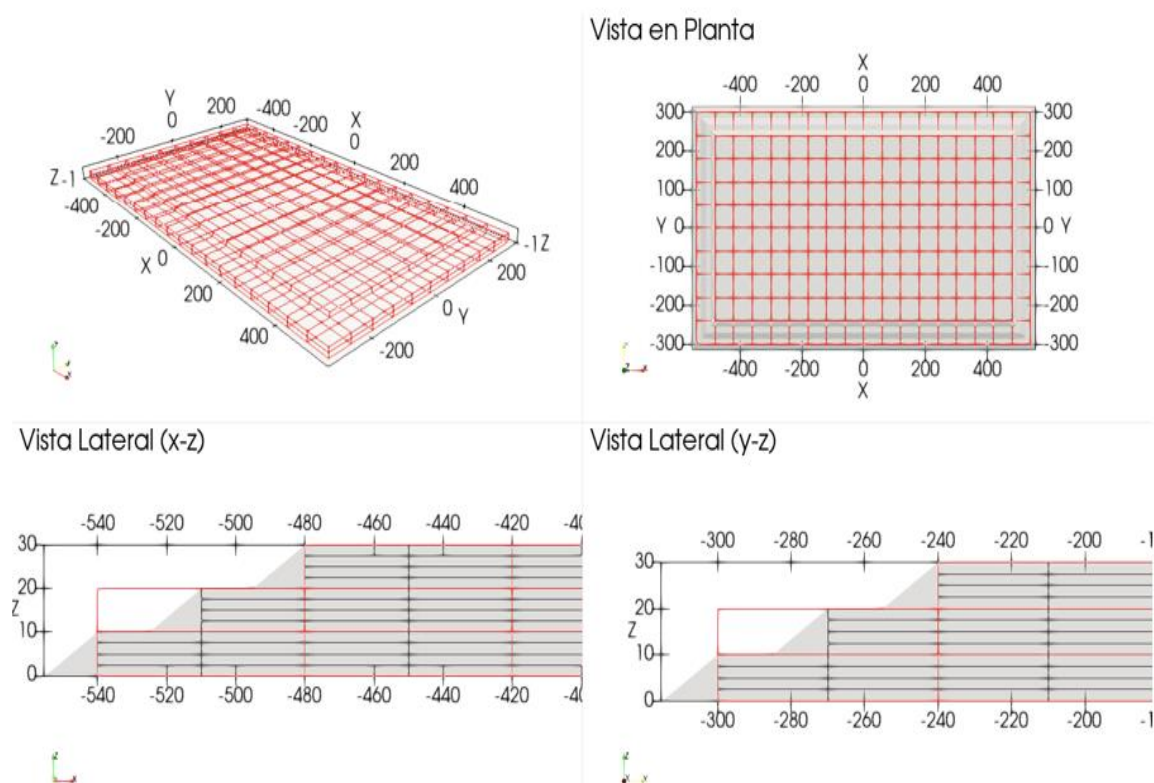


Figura 29: Vista general malla pila de sulfuros a estudiar (línea negra) superpuesta con módulos de optimización (línea roja).

En cuanto a la enumeración de los módulos del modelo de optimización y la configuración de las áreas de riego, estas se detallan a continuación:

342	343	344	165	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359
324	325	326	147	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341
306	307	308	129	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323
288	289	290	111	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305
270	271	272	93	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287
252	253	254	75	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269
234	235	236	57	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251
216	217	218	39	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233
198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215
180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197
A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	A34	A35

Figura 30: Enumeración de módulos y áreas de riego en el segundo piso de la pila de sulfuros.
Fuente: Elaboración propia (2023).

	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	
	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	
	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	
	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	
	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	
	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	
	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	
	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	
	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	
	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	
A36	A37	A38	A39	A40	A41	A42	A43	A44	A45	A46	A47	A48	A49	A50	A51	A52	A53

Figura 31: Enumeración de módulos y áreas de riego en el tercer piso de la pila de sulfuros. Fuente: Elaboración propia (2023).

B. Simulación de escenario de referencia E_0 con el modelo fenomenológico

Para realizar la ejecución del modelo de optimización, fueron ejecutados escenarios de referencia para obtener una curva de producción individual de cada módulo, utilizando el modelo fenomenológico.

En estos escenarios se ejecutó el modelo considerando una condición inicial por piso donde cada módulo inferior ya fue agotado previamente considerando un riego constante hasta que se recupera todo el cobre del piso, así se puede asegurar que el cobre que llega al fondo de la pila proviene exclusivamente del módulo bajo riego.

Una visión global de la ejecución del modelo fenomenológico para obtener este escenario de referencia se presenta en la Figura 32, mientras que las curvas de producción por módulo de optimización son las presentadas en la Figura 33. Cabe mencionar que aquellos módulos de optimización en los que la masa de mineral que contienen es una fracción distinta a la evaluada en los escenarios de referencia, esta curva de producción fue escalada para asegurar que el mineral que se produce es el mismo contenido en el módulo.

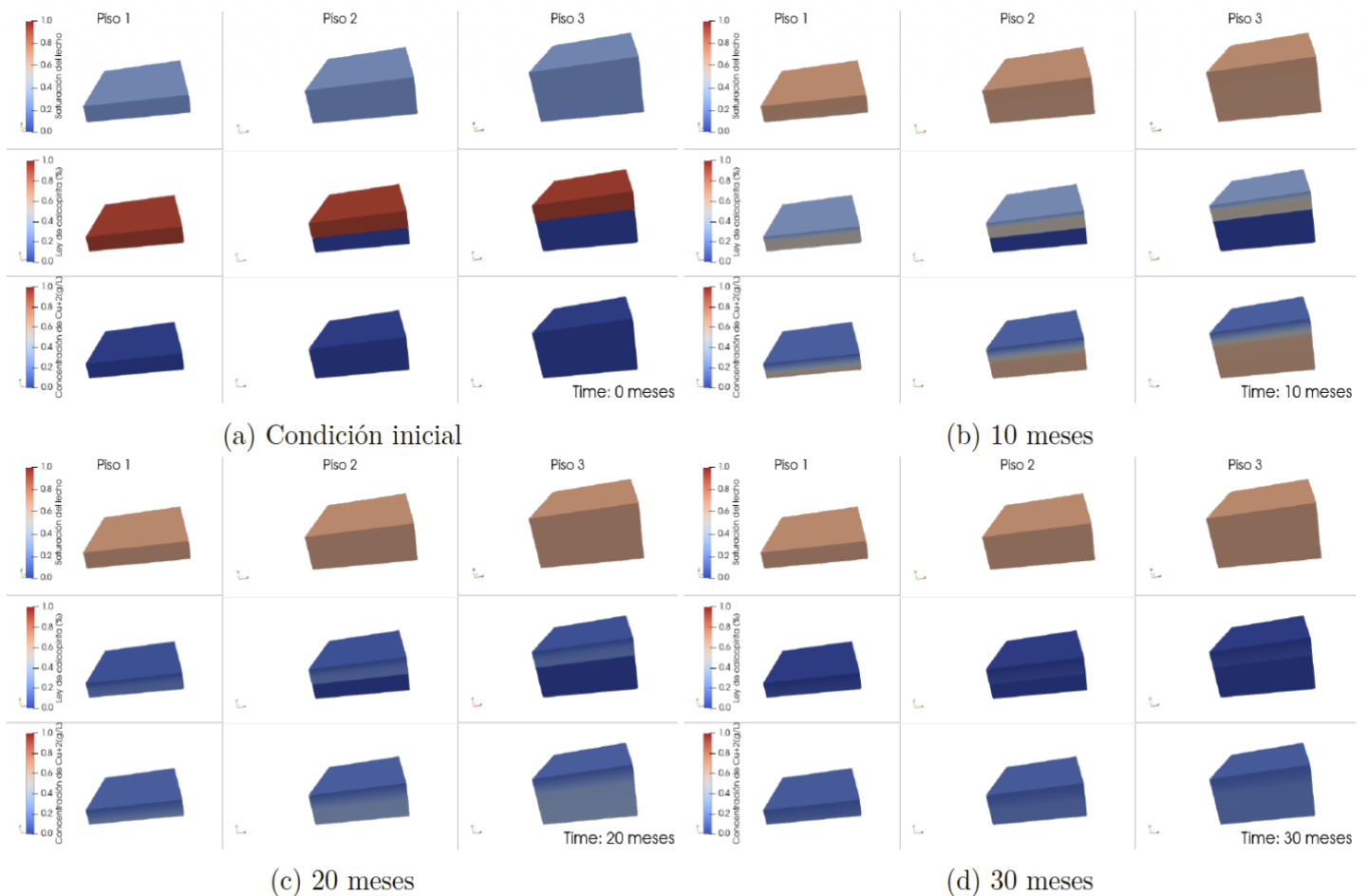


Figura 32: Ejecución escenario de referencia para distintos meses hasta el agotamiento de los módulos. Por cada caso se muestra la saturación del lecho (superior), ley de calcopirita (centro) y concentración de cobre soluble (inferior).

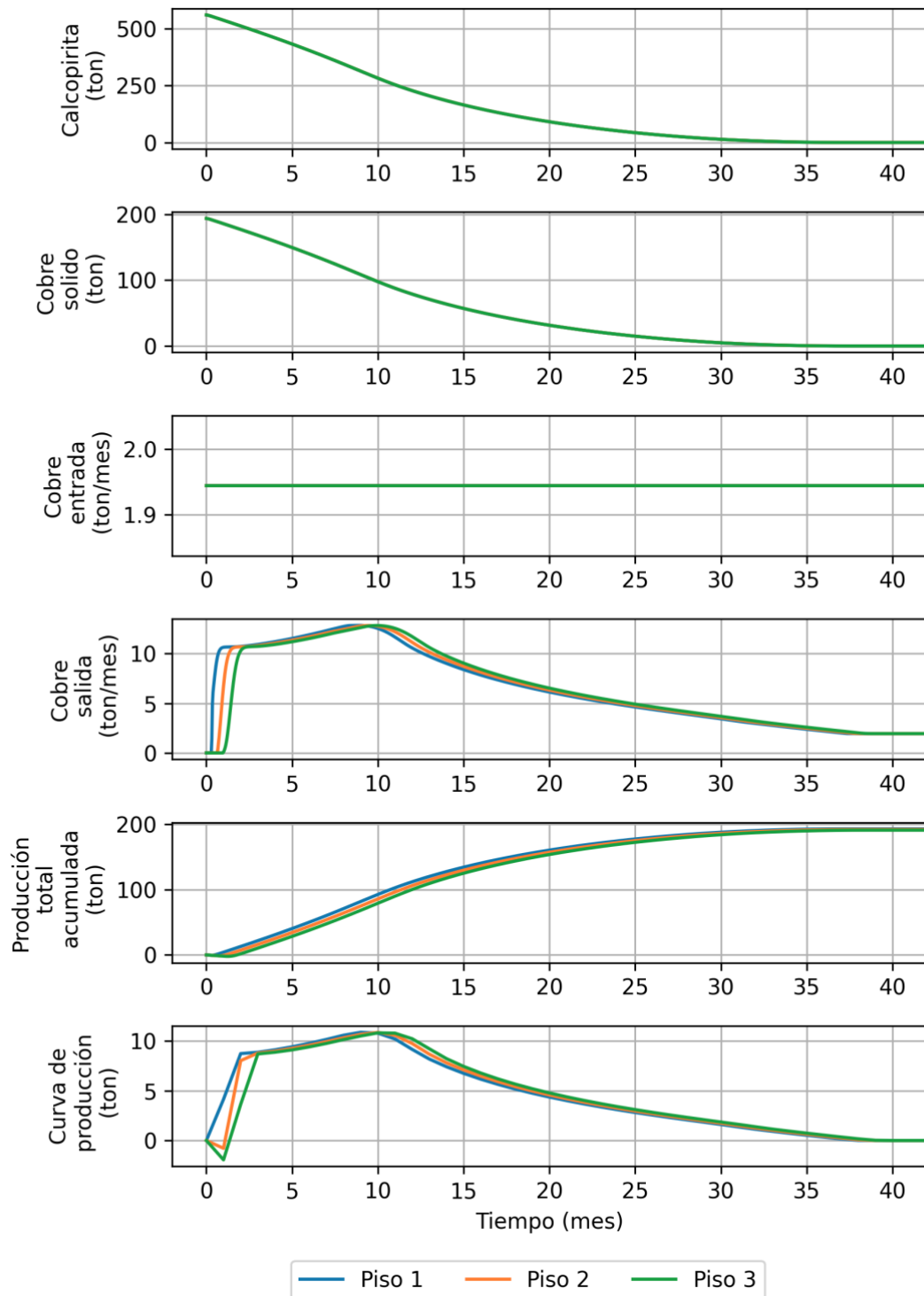


Figura 33: Curvas de producción obtenidas para escenarios de referencia.

C. Complementos del plan de riego y análisis de resultados

Tabla 9: Tabla extendida con pasos/saltos para el análisis sensibilidad.

Parámetro	Valores de análisis
Precio ácido	60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270
Precio energía	60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200
Precio agua	1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3, 2.5, 2.7, 3.0
Precio cobre	2.75, 3.00, 3.25, 3.5, 3.75, 4.00, 4.25, 4.50
Consumo ácido	5, 9, 13, 17, 21, 25, 30
Makeup agua	0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.11, 0.14, 0.17, 0.21