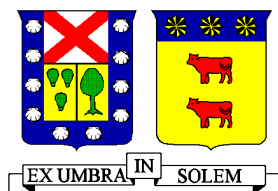


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE



ANÁLISIS DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN MINERA BAJO EL PRISMA DE LA TECNOLOGÍA DIRECT BLOCK SCHEDULING

ARANTZA MIQUELES GÁLVEZ

Memoria para optar al Título de
Ingeniera Civil de Minas

Profesor Guía
Juan Camus

Profesor Patrocinante
Gonzalo Nelis

03 de octubre de 2023

Resumen

La industria minera a cielo abierto es una de las principales actividades económicas a nivel global, cuyo propósito fundamental es la transformación de recursos minerales en beneficios económicos. En este contexto, la planificación minera desempeña un papel crucial para garantizar la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones. Este proceso implica la generación de un plan de producción a largo plazo (LoM) que abarca la vida útil de la mina, dividiéndola en periodos anuales, y tiene como objetivo maximizar el valor del negocio considerando diversas restricciones operativas y económicas.

La metodología tradicional utilizada en la planificación minera a cielo abierto se basa en la resolución de problemas de diseño de pits anidados mediante herramientas de optimización matemática, como el algoritmo de Lerchs & Grossmann. Sin embargo, esta metodología tiende a no considerar la dimensión temporal en la definición de la envolvente económica.

En contraste, el Agendamiento Directo de Bloques (DBS) integra el tiempo desde el inicio, permitiendo la definición de la envolvente económica junto con la secuencia de extracción optima a nivel de modelo de bloques. De esta forma, el DBS ha demostrado ser efectivo en la generación de planes mineros que maximizan el valor económico de la mina.

Los objetivos de esta investigación se centran en comparar las ventajas de la metodología DBS con la metodología tradicional al integrar distintos horizontes temporales en un solo proceso de optimización.

En el primer caso de estudio, se observa que el DBS optimiza la ubicación y secuencia de las fases de extracción, generando un aumento significativo en el valor económico en relación con el caso base.

En el segundo caso de estudio, la comparación entre el plan utilizando planificación integrada en comparación a la metodología tradicional existe un aumento en el valor económico, especialmente en los primeros años del plan, a diferencia del caso base.

Con el análisis de los resultados de ambos casos de estudio se puede concluir que los resultados entregados por el DBS presentan similitudes con las fases creadas utilizando la metodología tradicional. A diferencia de lo que ocurre comúnmente en la metodología tradicional el DBS tienen a saturar planta desde el inicio del plan debido a que este busca desde el inicio sectores que tengan una mejor ley.

Abstract

Open-pit mining is one of the major global economic activities, primarily focused on transforming mineral resources into economic benefits. Within this context, mine planning plays a pivotal role in ensuring operational efficiency and profitability. This process involves the creation of a long-term production plan (LoM) through the mine's lifespan, divided into annual periods, with the objective of maximizing business value while considering various operational and economic constraints.

The traditional methodology employed in open-pit mining planning relies on solving nested pit design problems through mathematical optimization tools, such as the Lerchs & Grossmann algorithm, and the expertise of planners. Nevertheless, this methodology lacks proper consideration of the temporal dimension in defining the economic envelope, and only partially incorporates it in the selection of extraction phases.

In contrast, Direct Block Scheduling (DBS) integrates time from the beginning, enabling the definition of the economic envelope along with the optimal extraction sequence at the block model level. Consequently, DBS has proven effective in generating mining plans that maximize the mine's economic value.

The objectives of this research are centered around comparing the advantages of the DBS methodology with the traditional approach by integrating various temporal horizons into a single optimization process.

In the first case study, it is observed that DBS optimizes the location and sequence of extraction phases, resulting in a significant increase in economic value compared to the base case.

In the second case study, when comparing the plan utilizing integrated planning with the traditional methodology, there is an increase in economic value, particularly in the initial years of the plan, in contrast to the base case.

Dedicatoria

A Aquiles, por ser mi mayor motivación todos los días

Agradecimientos

A mi querida madre, Pamela, quiero expresar mi profundo agradecimiento, ya que este logro es tuyo tanto como mío. Tu incansable esfuerzo y apoyo inquebrantable han sido pilares de mi éxito académico. A mi hermano Aquiles, gracias por ser mi constante motivación para ser una mejor persona cada día, tu confianza en mí me ha impulsado a alcanzar este hito. A Marcelo, tus valiosos consejos, apoyo incondicional y sabias enseñanzas han sido fundamentales en mi desarrollo académico y personal.

A mi fiel compañera de estudio, mi gatita Nina, por estar a mi lado durante estas largas noches de estudio, entregándome su compañía.

A mi familia extendida, en especial a mis abuelos, quienes siempre han estado dispuestos a escucharme, aconsejarme y celebrar conmigo cada logro. A Belén, mi compañera de vida, por ser mi roca, acompañarme en mis noches de estudio y siempre sacarme una sonrisa en los momentos más desafiantes.

A Carlos, mi mayor apoyo a lo largo de estos años, por el amor inmenso que me has brindado y por ayudarme a creer en mí misma y en mis capacidades.

A Antonia, quien llegó a mi vida de manera fortuita y se convirtió en uno de los mejores regalos que la universidad me dio. Gracias por tu apoyo constante y por esas invaluable noches de estudio; sin ti, esto habría sido mucho más difícil.

A todos aquellos que conocí en la universidad, quienes de diversas formas contribuyeron a que este logro fuera posible. A las niñas y niños de OKPA, que se convirtieron en mi refugio durante estos años universitarios donde nos apoyamos mutuamente y juntos estamos alcanzando nuestras metas. A Gonzalo, que ha sido un pilar fundamental estos últimos años, te aprecio enormemente amigo.

Al Departamento de Ingeniería Civil de Minas (ICMIN), por impartirme los conocimientos fundamentales que han forjado mi carrera. A Leslie, por las interminables conversaciones y su apoyo inquebrantable.

Al Profesor Gonzalo, quien confió en mí como su memorista cuando apenas tenía una idea básica del tema. Gracias por todo lo que me ha enseñado y por brindarme la oportunidad de crecer académicamente bajo su guía.

Al equipo de InnoVaMine, por permitirme ser parte de esta experiencia enriquecedora. A Juan Camus, por compartirme su vasto conocimiento y a Fernando, por su disposición para enseñarme.

A Mauricio, mi gran fuente de inspiración personal, quien me introdujo en el fascinante mundo de la industria minera.

Y finalmente, quiero agradecerme a mí misma por haber llegado hasta aquí y cumplir mi sueño de convertirme en Ingeniera Civil de Minas. Este logro es el resultado de mi esfuerzo, dedicación y perseverancia, y estoy orgullosa de haberlo alcanzado.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	9
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo general	10
1.1.1	Objetivos específicos	10
2.	Revisión bibliográfica	12
2.1	Metodología tradicional de Planificación a Cielo Abierto	12
2.1.1	Problema del Pit final	14
2.1.2	Pits anidados.....	14
2.1.3	Lerchs y Grossmann	15
2.1.4	Deficiencias de la metodología tradicional	18
2.2	Direct Block Scheduling.....	20
2.2.1	Formulación matemática	22
2.2.2	Deficiencias DBS	23
2.3	Comparativa	23
2.4	Planificación integrada	25
3.	Metodología	30
3.1	Metodología Caso de estudio 1.....	31
3.2	Metodología Caso de estudio 2.....	31
3.	Resultados	33
4.1	Caso de estudio 1: Metodología tradicional vs DBS.....	33
4.1.1	Información Inicial	33
4.1.2	Modelamiento DBS	36
4.1.3	Diseño de fases	38
4.1.4	Optimización de planes mineros MPSO	39
4.2	Caso de estudio 2: Metodología tradicional vs Planificación Integrada.....	41
4.2.1	Información Base.....	41
4.2.2	Modelamiento DBS	43
4.2.3	Diseño de fases	44
4.2.4	Plan minero MPSO.....	45
5.	Análisis de Resultados.....	47
6.	Conclusión	59
7.	Referencias.....	61

Índice de tablas

Tabla 1: Información modelo de bloques	34
Tabla 2: Cubicación MB según categoría.....	35
Tabla 3: Parámetros técnico-económicos.	36
Tabla 4: Información Modelo de bloques.....	42
Tabla 5: Principales parámetros económicos.....	42

Índice de figuras

Figura 1: Matriz modelo de bloques con leyes.	16
Figura 2: Matriz modelo de bloques actualizado	16
Figura 3: Matriz de suma acumulativa.	17
Figura 4: Matriz P.	17
Figura 5: Secuencias de extracción Worst Case (izquierda) y Best Case (derecha). (Vargas, 2011) 19	
Figura 6: Problema del GAP. (Meagher, et al., 2014)	19
Figura 7: Comparativa metodología tradicional vs DBS. (Morales et al., 2015)	24
Figura 8: Topografía inicial Caso Base	33
Figura 9: Periodos DBS.....	37
Figura 10: Elección de Fases DBS (cota 4160).	38
Figura 11: Diseño de fases (cota 4100)	39
Figura 12: Gráfico Extracción mina	40
Figura 13: Flujo de Caja Descontado Acumulado.	40
Figura 14: Topografía inicial.....	41
Figura 15: Periodos DBS.....	43
Figura 16: Secuencia Fases cota 2085.	44
Figura 17: Vista general diseño.	45
Figura 18: Gráfico Extracción mina	46
Figura 19: Flujo de Caja Descontado Acumulado.	46
Figura 20: Comparación fases Caso Base vs secuencia DBS.	48
Figura 21: Comparación secuencia DBS vs Caso Base (z:2085).....	49
Figura 22: Comparación secuencia DBS vs Caso Base (z:2325).....	50

Figura 23: Alimentación Concentradora	52
Figura 24: Alimentación Dump Leaching	53
Figura 25: Comparación alimentación a planta	54
Figura 26: Gráfico FCD Caso de Estudio 1	55
Figura 27: Gráfico FCDA Caso de Estudio 1	56
Figura 28: Gráfico FCD Caso de Estudio 2.....	57
Figura 29: Gráfico FCDA Caso de Estudio 2	58

1. Introducción

La industria minera es una de las principales actividades económicas a nivel mundial, cuyo objetivo es transformar un recurso mineral en un beneficio económico. Parte importante de este objetivo es tarea de la planificación minera, donde se obtiene un negocio productivo.

En este contexto, es posible identificar la planificación a largo plazo, que proporciona un plan de producción que determina la cantidad de mineral y material que se debe mover a lo largo de la vida útil de la mina. Este horizonte de evaluación se divide habitualmente en periodos de un año y su objetivo es maximizar el valor del negocio teniendo en cuenta consideraciones como las restricciones de capacidad de extracción y transporte, capacidad de procesamiento en planta, relación estéril mineral, ángulo de talud, entre otras.

En la planificación minera a cielo abierto, se emplea un método tradicional para definir las secuencias de extracción. Este proceso comienza con una etapa de definición de la envolvente económica, donde, posteriormente se determinan y diseñan las fases. Según este método, las fases se eligen a partir de un cálculo inicial de pits anidados, que implica resolver el problema del pit final para una serie de precios ficticios. Estos pits se agrupan según criterios operativos, de capacidad de extracción y de procesamiento.

Para lograr este objetivo, se usan herramientas de optimización matemática, software de diseño y experiencias del planificador. Este diseño genera una mina operativa, a partir de los resultados de los procesos de optimización, donde se considera el dimensionamiento de los espacios operacionales, ubicación de rampas de acceso, selección de flotas de equipos, entre otros. Luego, a partir del diseño de las fases, se genera un plan minero que incorpora el tiempo para obtener la mejor secuencia de extracción en términos de valor descontado. Sin embargo, este enfoque deja de lado la componente temporal en la definición de la envolvente económica, y solo la integra de forma parcial en la selección de las fases, que se realiza a partir del análisis de las mejores y peores secuencias de extracción.

Por otra parte, existe otro método llamado “Agendamiento Directo de Bloques”, el cual integra el tiempo para establecer la envolvente económica en conjunto con la definición de la secuencia de extracción optima a nivel del modelo de bloques. Resolver este problema es más demandante en recursos que el problema del pit final, y en el pasado no ha logrado ser

abordado con los recursos computacionales disponibles. Sin embargo, en la actualidad existen paquetes de software con algoritmos que permiten su resolución, lo que resulta en periodos de extracción y destino de cada bloque que genera el mayor valor actual neto.

En la presente memoria se abordará el problema de cómo es posible mejorar el plan de producción de una mina a rajo abierto, usando la característica de selectividad de la tecnología DBS. En la metodología tradicional, se trabaja con el promedio de los rendimientos los cuales se agrupan en periodos anuales, lo cual es aceptable para el largo plazo, pero no lo es para el corto y mediano plazo. A raíz de esta deficiencia, se pretende utilizar la metodología DBS para obtener planes que cumplan de mejor forma con los objetivos de corto y mediano plazo en los primeros años de operación. Esto proporciona un plan minero integrado, donde en una sola optimización se reúnen los periodos con un soporte de tiempo variable, el cual debe considerar la planificación de corto, mediano y largo plazo. La idea principal es que en vez de definir un soporte de tiempo anual para la elaboración de un plan minero LoM, éste se realice mediante la tecnología DBS y un soporte de tiempo de meses para el corto plazo, trimestres y semestres para el mediano plazo, y años y paquetes de años para el largo plazo. Con esto, se busca obtener un plan minero LoM con una mayor precisión y robustez, y que además brinde un mayor valor económico.

1.1Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Comparar las ventajas de utilizar la metodología DBS por sobre la metodología tradicional al integrar distintos horizontes temporales un solo proceso de optimización.

1.1.1 Objetivos específicos

- Mostrar que una planificación integrada, considerando horizontes temporales distintos por periodos, es más efectiva, en términos de cumplimiento de metas de producción y valor económico.

- Evaluar si la visión temporal, de corto, mediano y largo plazo, que tiene actualmente el proceso de planificación minera, pudiera mejorarse al usar la tecnología DBS.
- Determinar en qué circunstancias la metodología DBS presenta mejores resultados en términos económicos y operativos que la metodología tradicional.
- Evaluar si el diseño de fases guiado por DBS logra capturar más valor que la metodología tradicional.

2. Revisión bibliográfica

2.1 Metodología tradicional de Planificación a Cielo Abierto

La planificación minera es una parte esencial para el desarrollo de un proyecto minero, dentro del cual se define el método de explotación, la forma que será extraído el recurso, además del cómo y cuándo el mineral extraído será procesado, con el fin de transformar el yacimiento en un negocio rentable y obtener un máximo beneficio para la empresa (Miranda, 2017).

Actualmente, la planificación de la explotación de una mina a cielo abierto se realiza a partir de un modelo de bloques mediante un proceso que sigue los siguientes pasos (Camus, J., 2023):

1. Valorización de cada uno de los bloques del modelo de bloques, lo cual se realiza en base a la estimación de las reservas de mineral y su distribución espacial mediante la interpretación de la información geológica obtenida de los sondeos realizados.
2. Determinación del rajo final y secuencia de minado, lo cual se puede realizar mediante el algoritmo de Lerchs y Grossman, dentro del cual se consideran variables como la ley del mineral, los costos de extracción y el precio del mineral de interés, y con esto calcular la cantidad de mineral extraíble para que el negocio sea rentable.
3. Diseño operacional de fases de explotación. Mediante herramientas de diseño los planificadores deben crear un conjunto de fases operativas de la mina, donde se deben considerar las restricciones de producción y el diseño operativo de cada una de las fases.
4. Mezcla y programación de la producción LoM, donde se obtiene el plan de producción que considera restricciones de capacidad mina, o restricciones de leyes de alimentación a procesos, lo que condiciona la secuencia de extracción. Esta etapa

es un proceso iterativo donde se busca llegar al mejor plan de producción según la evaluación técnica económica.

El método tradicional para la generación del contorno final de un rajo óptimo corresponde al algoritmo de Lerchs y Grossmann (1965). En la actualidad, este algoritmo no sólo se usa para determinar el límite final del rajo, sino que también la secuencia de extracción. Para esto, el algoritmo se usa variando alguno de los parámetros de entrada, para generar rajos intermedios, que en el caso del software Whittle es el precio del producto. Posterior a esto, y con ayuda de herramientas de diseño, los planificadores deben diseñar un conjunto de fases operativas de la mina. Estas son luego programadas y optimizadas según las restricciones de capacidad y de diseño de la mina, obteniendo como resultado un plan de vida útil de la mina, en conjunto con una evaluación económica.

El objetivo del algoritmo de LG es diseñar el contorno del rajo para maximizar la diferencia entre el valor total del mineral extraído y los costos totales de extracción (Lerchs & Grossmann, 1965). Este algoritmo no considera la tasa de descuento ni las restricciones de capacidad, por lo que no puede resolver el problema intertemporal que existe en la secuencia de fases de la mina.

Las herramientas computacionales que son utilizadas actualmente para la mezcla y programación de fases operativas consideran el valor del dinero en el tiempo y restricciones de capacidad del complejo minero, lo que generalmente provoca un cambio en el límite final del rajo que entrega LG. Este es un primer indicio para detectar una de las falencias que presenta LG al no tener en cuenta este factor de actualización en sus cálculos.

Lo anterior se vuelve mas importante al momento de construir los pits anidados, con LG, que sirve como guía para el diseño de las fases de explotación. Como LG no considera la tasa de descuento, ni las capacidades mina y planta, la secuencia de pits anidados que define este algoritmo, variando el precio del producto, no es más que un conjunto de pits donde su costo de extracción es creciente en el tiempo. La particularidad de esto es que la secuencia definida con este método es la misma para cualquier escenario de precios y capacidades.

Se ha trabajado para responder a la necesidad de considerar el factor temporal a la hora de tomar una decisión económica y poder estudiar su rentabilidad en el tiempo. El paso 4 es el único en esta lista de actividades que utiliza una optimización intertemporal, junto con las restricciones de capacidad de procesamiento y mina. (Camus, J., 2017).

Sin embargo, al incorporar la tasa de descuento y las capacidades mina y planta del proyecto u operación en el cálculo, cosa que será analizada en la siguiente sección, se demuestra que la secuencia minera sí depende de estas variables, si el objetivo es maximizar el valor presente neto, NPV, del negocio.

2.1.1 Problema del Pit final

El problema del pit final se basa en el cálculo óptimo de este, el cual se puede escribir como un problema de optimización lineal: Sea $b \in B$ el conjunto de bloques, $(i, j) \in P$ el conjunto de precedencias geométricas entre ellos, y v_b el beneficio de extraer el bloque b . La variable de decisión x_b es 1 si el bloque b es extraído y 0 en caso contrario. (Nelis, G., 2021). Así, el problema se puede plantear como la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \text{máx } \sum_{b \in B} x_b v_b && \text{(Ecuación 1)} \\ \text{s. a. } & x_i \leq x_j \quad \forall (i, j) \in P \\ & x_b \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B \end{aligned}$$

Lerchs y Grossmann resuelven este problema en su algoritmo, el cual ha sido implementado en software comerciales debido a la gran eficiencia y precisión que se tiene en la solución.

2.1.2 Pits anidados

Al momento de definir el pit final o envolvente económica, se debe realizar una valorización del modelo de bloques. Para realizar esto se calculan los ingresos de cada bloque, según el precio de los minerales de interés, sus leyes, recuperaciones y tonelajes.

Con esta información se calculan los costos totales, considerando los costos mina y los costos asociados al procesamiento. Luego, basándose en esos parámetros se obtiene el

beneficio asociado a cada bloque, con lo cual se obtiene la valorización de entrada para resolver el problema del pit final.

El beneficio se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\text{Beneficio} = R * Lm * P * T - (Cm + Cp) * T \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

R= Recuperación del mineral

Lm= Ley media del mineral

P= Precio del mineral

Cm= Costo mina por tonelada

Cp= Costo de procesamiento por tonelada

T= Tonelaje

Para el cálculo del beneficio se debe considerar que existe más de un proceso posible para cada bloque, por lo que su valor se debe definir según estrategias de ley de corte, o considerando el destino que entregue un mayor valor económico.

También se deben considerar las restricciones de precedencia, donde se establece cuales bloques deben ser extraídos antes que otros, lo cual corresponde a los ángulos de talud globales.

Con la información anterior como input, se generan pits de máximo valor no descontado, mediante el algoritmo de Lerchs y Grossmann, para diferentes precios del mineral, donde la Ecuación 2, mostrada anteriormente se modifica y se incorpora un factor llamado Revenue Factor (RF), el cual multiplica el precio, y suele ir en el rango de 0 a 1.

Como resultado de esto, se obtiene una serie de conos contenidos uno dentro del otro a medida que este factor RF va aumentando.

2.1.3 Lerchs y Grossmann

El algoritmo de Lerchs y Grossman busca determinar el límite final óptimo del pit, mediante un proceso iterativo de programación dinámica bidimensional, logrando obtener el mayor beneficio económico posible. (Vergara, 2020)

El algoritmo tiene por objetivo determinar el límite final óptimo en una sección vertical, maximizando el beneficio neto. Es importante tener en cuenta que, aunque el límite final suavizado puede no ser óptimo en cada sección individual, el algoritmo busca maximizar el beneficio neto global.

A continuación, se presenta como se debe utilizar el algoritmo (Canales, 2018). En la Figura 1 se presenta una matriz de modelo de bloques con leyes conocidas.

0	0	0	0	1.2	1.2	1.4	1.8	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.3	1.7	2.6	0.8	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.7	2	2.2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2.1	2.6	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2	1.2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1.2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 1: Matriz modelo de bloques con leyes.

Luego, se debe obtener el valor económico de cada bloque. Para esto se realiza la suma del beneficio de su extracción menos los costos de este proceso y del procesamiento del mineral, como se muestra en la Figura 2

-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.14	0.14	0.17	0.23	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.15	0.21	0.35	0.08	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.21	0.26	0.29	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.27	0.35	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.26	0.14	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.14	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05

Figura 2: Matriz modelo de bloques actualizado

La siguiente etapa consiste en la suma acumulativa de arriba hacia abajo de estos valores en cada columna de forma independiente. Además, se agrega una fila con valores igual a 0 sobre la matriz, como se muestra en la Figura 3

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.14	0.14	0.17	0.23	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	0.09	0.29	0.38	0.57	0.03	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
-0.14	-0.14	-0.14	-0.14	0.05	0.50	0.63	0.86	-0.02	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14
-0.18	-0.18	-0.18	-0.18	0.00	0.45	0.90	1.20	-0.06	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18

-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.05	0.41	1.16	1.34	-0.11	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23
-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.09	0.36	1.11	1.47	-0.15	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27
-0.32	-0.32	-0.32	-0.32	-0.14	0.32	1.07	1.43	-0.20	-0.32	-0.32	-0.32	-0.32

Figura 3: Matriz de suma acumulativa.

Finalmente, se define la matriz $P_{i,j}$, la cual se resuelve mediante la siguiente expresión, comenzando desde el extremo superior izquierdo:

$$P_{i,j} = M_{i,j} + \text{Max}(P_{i+k,j-1}), \quad \text{con } k = 1, 0, -1$$

Quedando una matriz como la que se muestra en la Figura 4.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.14	0.27	0.59	1.14	1.70	2.28	2.57	2.52	2.48
-0.09	-0.14	-0.14	-0.14	0.05	0.42	0.92	1.74	2.33	2.61	2.57	2.48	2.43
-0.14	-0.23	-0.27	-0.27	-0.09	0.54	1.17	2.30	2.70	2.66	2.57	2.43	2.34
-0.18	-0.32	-0.41	-0.45	-0.27	0.36	1.44	2.72	2.79	2.70	2.52	2.39	2.25
-0.23	-0.41	-0.54	-0.63	-0.50	0.14	1.52	2.85	2.88	2.66	2.48	2.30	2.16
-0.27	-0.50	-0.68	-0.81	-0.72	-0.14	1.25	2.99	2.84	2.61	2.39	2.21	2.03
-0.32	-0.59	-0.81	-0.99	-0.95	-0.41	0.93	2.67	2.79	2.52	2.30	2.07	1.89

Figura 4: Matriz P.

Una vez que se define la matriz $P_{i,j}$ se puede obtener el límite final del pit. Para esto se debe seguir el bloque con mayor valor desde el extremo superior derecho evaluando los bloques que se encuentra arriba a la izquierda, a la izquierda y abajo a la izquierda. Y con esto, ir marcando la forma del pit final.

Como se ha mencionado anteriormente, este algoritmo genera la máxima cantidad de fases usando como única restricción la pendiente máxima. Esta razón hace necesaria una segunda etapa en este proceso, con el objetivo de obtener un mayor detalle en las restricciones de producción y financieras.

En esta segunda etapa del proceso de deben considerar:

- La tasa de descuento en el tiempo
- Tasas de producción
- Capacidades al momento de generar las fases

2.1.4 Deficiencias de la metodología tradicional

- **Selección del pit final**

Una vez que se ha establecido la envolvente económica que limita las reservas del proyecto, esta elección debe basarse en los objetivos específicos del proyecto y en su estrategia de negocio. Generalmente, esta busca alcanzar dos metas clave: maximizar el valor del proyecto mientras se reducen los costos, al mismo tiempo que se busca aumentar tanto las reservas como la vida útil de la mina. (Miranda, 2017).

Considerando esta estrategia es que el proceso de selección del pit final corresponde a una evaluación económica donde se estudian los pits anidados en diferentes escenarios preliminares de plan minero. Para esto, se requiere un análisis de tonelajes de mineral y estéril de cada pit anidado, además de un análisis del valor acumulado en cada pit.

Además, se debe realizar una evaluación del valor asociado a la extracción, la cual se realiza mediante dos secuencias, donde se estudia el mejor y el peor caso los cuales se analizan a través del valor presente neto del rajo. El mejor caso se considera una extracción pit a pit, la cual minimiza la movilización temprana de estéril y como consecuencia se obtiene una maximización del VAN. Sin embargo, esta secuencia no funciona desde un punto de vista operativo, ya que no asegura que exista espacio suficiente para el trabajo y circulación de equipos. Al contrario, el peor caso, corresponde a una extracción banco a banco, donde se asegura la factibilidad operativa de la secuencia, pero se castiga el VAN debido a que se comienza a extraer estéril tempranamente.

En esta etapa recién se incluyen variables que se relacionan con el tiempo, como el límite de capacidad de procesos, límite de capacidad de movimiento mina, tasa de descuento, inversiones, entre otros. Lo cual impide que se obtenga la solución óptima para el diseño del pit final.

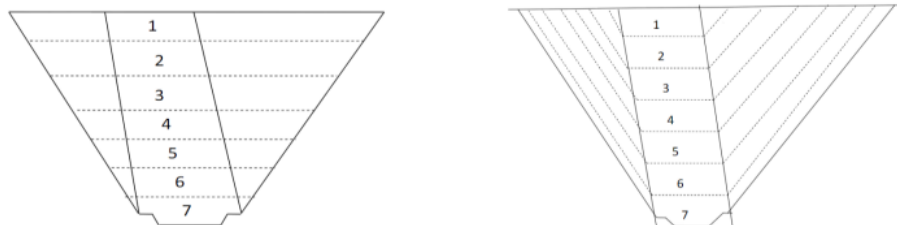


Figura 5: Secuencias de extracción Worst Case (izquierda) y Best Case (derecha). (Vargas, 2011)

• Problema del Gap

Uno de los problemas que se presenta en la metodología al momento de la elección de fases desde los pits anidados corresponde a que la variación del precio en una tasa fija no asegura que exista una relación entre los tamaños de los pits consecutivos.

Esto, trae una complicación al momento de la selección de fases y como consecuencia en la elaboración de los planes de producción. En la práctica, cuando se genera esta situación es el planificador quien decide como abordar este problema, lo que puede conllevar configuraciones que tengan asociados planes mineros subóptimos en términos de la maximización del VAN del proyecto (Meagher et al., 2014)

Esta situación se muestra en la Figura 6.

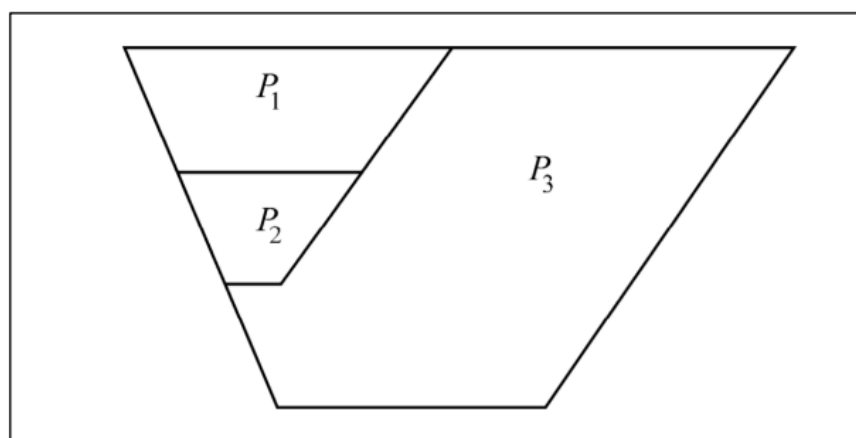


Figura 6: Problema del GAP. (Meagher, et al., 2014)

• Valor del dinero en el tiempo

Como se ha mencionado anteriormente existe una deficiencia en la metodología tradicional al no considerar el valor del dinero en el tiempo. La consideración de este factor es esencial en la planificación minera a largo plazo debido a factores claves que afectan la viabilidad económica y financiera de una operación minera a lo largo de su vida útil.

Bajo este análisis se demuestra que existe una gran limitación al momento de utilizar la metodología tradicional para la planificación, la cual tiene como base el algoritmo de Lerchs y Grossmann, el cual presenta deficiencias al no incorporar variables que, si deben ser consideradas en etapas posteriores al proceso, lo que no entrega una solución óptima al problema de la planificación.

2.2 Direct Block Scheduling

Recientemente, la industria minera comenzó a implementar una innovación en la planificación y diseño de una mina a rajo abierto, que corresponde a la tecnología DBS (Agendamiento Directo de Bloques), la cual comenzó con la publicación de la tesis doctoral de Johnson (Johnson, T., 1968). Esta metodología alternativa tiene un enfoque en la temporalidad del problema y el costo de oportunidad, y busca resolver el problema de en qué momento es más conveniente extraer un bloque. Realiza la asignación de un periodo de extracción directamente a cada bloque mediante la solución de una modelo de optimización matemática (Johnson, 1968).

A su vez, considera el valor del dinero en el tiempo y también las limitaciones de capacidad mina y planta, lo que entrega como resultado un plan de producción computacional, que sirve de guía para diseñar de mejor forma las fases de explotación. Al igual que en el proceso actual, la mezcla y extracción de estas fases se hace con las mismas herramientas, las que finalmente producen un plan minero operativo, que usualmente es económicamente más robusto que el plan hecho con la tecnología actual (LG). La tecnología DBS brinda una mejor selectividad, en cuanto a la extracción de bloques que, progresivamente, aportan un mayor valor presente al negocio, en cada periodo del plan de producción. Esta tecnología ha sido estudiada y ha presentado diferentes variaciones desde que Johnson lo propuso hasta la actualidad (Morales et al., 2015; Ribeiro et al., 2018).

La mejor selectividad en la extracción de los bloques, que tiene la tecnología DBS, es clave para el negocio minero. En efecto, esto no sólo sirve para mejorar la economía de un plan minero, con soporte de tiempo anual para toda la vida de la mina, LoM, sino que también permitiría realizar planes de producción más detallados para el corto, mediano y largo plazo. Y todo esto hecho simultáneamente, en una sola optimización.

A continuación, se describe el algoritmo utilizado en la herramienta MiningMath donde la optimización se puede resumir en tres etapas:

- 1) Flexibilidad en la optimización: donde se obtienen como resultado de diferentes casos y soluciones para una misma mina. Ya que no existe restricciones de fases de explotación, estas soluciones solo se ven limitadas a los parámetros de entrada. Los cuales pueden ser restricciones geométricas y/u operacionales, opciones de ancho de minado y/o ancho de fondo de la mina, tasa máxima de avance e importando superficies que limiten sectores la mina.
- 2) Eliminación de errores en ángulos de Talud: el modelo matemático entregado se basa en superficies generadas a partir de grupos de bloques con interés económico temporal en lugar de considerar cada bloque de forma individual. Esto permite eliminar errores en la adherencia a los ángulos de talud, a diferencia de métodos que se basan en la precedencia de bloques, los cuales generan ángulos de talud más pronunciados de lo necesario. Esta aproximación entrega resultados más realistas y menos riesgosos.
- 3) Maximización del Valor presente: el objetivo principal de esta optimización es maximizar el valor presente de la explotación minera. Para lograrlo, se utiliza la tasa de descuento en todos los cálculos para considerar el valor del dinero en el tiempo. Además de determinar qué bloques deben ser extraídos, se decide cuándo extraerlos y a qué destino deben enviarse, ya sea a la planta de procesamiento, lugares de acopio o botaderos definidos, realizando una optimización a la operación minera con el objetivo principal de obtener el mayor valor económico.

2.2.1 Formulación matemática

Para el algoritmo de Direct Block Scheduling (DBS) existen variantes de este algoritmo a continuación, se presenta una descripción del proceso:

- 1) Definición del modelo de bloques: corresponde a representar el yacimiento minero en forma de modelo de bloques, donde cada uno de estos contiene información sobre su contenido mineralógico, calidad, volumen y ubicación en la mina.
- 2) Establecer objetivos y restricciones: se definen los objetivos, como maximizar la recuperación del mineral o minimizar los costos de extracción. Además, se deben considerar las restricciones operativas, geotécnicas, ambientales, entre otras que puedan influir en la secuencia de extracción.
- 3) Formulación de la función objetivo: con el objetivo de que capture los objetivos específicos del proyecto minero, maximizando el valor económico de la extracción de bloques, considerando los precios de venta, costos de operación y restricciones.
- 4) Utilización de técnicas de optimización matemática: se utiliza programación entera mixta con el objetivo de encontrar la secuencia de extracción que maximice o minimice la función objetivo, considerando las restricciones planteadas.
- 5) Evaluación y ajuste de la solución: con los resultados obtenidos, se debe evaluar la viabilidad de esta y se realiza un análisis para verificar la robustez al momento de realizar cambios en los parámetros principales del modelo. Según esto, se realizan ajustes en la secuencia de extracción.

A continuación, se presenta una formulación equivalente al modelo creado por Johnson, donde se considera B como un conjunto de bloques y D con conjunto de destinos. Para cada bloque b se asume un beneficio p_b^d si el bloque b es enviado al destino d . Además, se puede definir un beneficio único por bloque como $p_b = \max_{d \in D} p_b^d$. Si R corresponde a un conjunto de recursos y el horizonte de planificación es de T periodos, $c_{r,t}$ corresponde a la cantidad de recursos r disponible al tiempo t y $q_{r,b}^d$ la cantidad de recurso r consumida si el bloque b es enviado al destino d . Finalmente, P corresponde a un conjunto de arcos (precedencias), tal que $(b, a) \in P$, lo que significa que el bloque b debe ser extraído antes que el bloque a .

Además, se definen variables binaras $x_{b,t}^d$ las cuales nos indican si el bloque b ha sido enviado al destino d en el periodo t y se asume que $p_{b,t}^d$ es de la forma $p_b^d/(1+\alpha)^t$ para una constante no negativa α (Vergara, R., 2020). Por lo que, la formulación viene dada por:

$$\begin{aligned}
(PABM) \max \quad & \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{d=1}^{|D|} \sum_{t=1}^T p_{b,t}^d (x_{b,t}^d - x_{b,t-1}^d) \\
\text{s.a.} \quad & \sum_{d=1}^{|D|} \sum_{b \in \mathcal{B}} q_{r,b}^d (x_{b,t}^d - x_{b,t-1}^d) \leq c_{r,t} \quad (\forall t \in \{1, \dots, T\})(\forall r \in R) \\
& \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^{|D|} (x_{b,t}^d - x_{b,t-1}^d) \leq 1 (\forall b \in \mathcal{B}) \\
& x_{b,t}^d \leq x_{a,t}^d \quad (\forall (a,b) \in \mathcal{P})(\forall t \in \{1, \dots, T\})(\forall d \in D) \\
& x_{b,t-1}^d \leq x_{b,t}^d \quad (b \in \mathcal{B})(\forall t \in \{1, \dots, T\})(\forall d \in D) \\
& x_{b,t-1}^d \in \{0,1\} \quad (b \in \mathcal{B})(\forall t \in \{1, \dots, T\})(\forall d \in D) \\
& x_{b,0} = 0 \quad (b \in \mathcal{B})(\forall d \in D)
\end{aligned}$$

2.2.2 Deficiencias DBS

Debido a la capacidad computacional que requiere el uso de esta tecnología debido al gran tamaño de los problemas y las dificultades de la aplicación de estos, es que se vuelve necesaria la utilización de simplificaciones que facilitan la implementación de la tecnología, como utilizar un límite de rajo final predefinido por LG, y una secuencia de mina para luego llevar a cabo una optimización intertemporal de DBS con estas restricciones. Es por esto que, si bien los resultados obtenidos de esta optimización pueden ser mejores a la metodología tradicional, aún se encuentran condicionados a datos de entrada entregados por LG.

2.3 Comparativa

Como resultado del DBS se tiene un plan minero computarizado y sin suavizar que se divide en periodos, que suelen ser anuales. Estos no son comparables con los “pit shell” obtenidos por LG, el cual nos entrega el pit final, donde el costo de extracción es igual al

precio de la materia prima a largo plazo, lo cual se convierte relevante a la hora de diseñar fases de minado.

Si bien, ambos métodos utilizan fases para crear un plan minero operativo, resulta más fácil diseñar estas fases con la metodología LG. Es por esto, que para la utilización de la tecnología DBS se requiere el conocimiento de lo que esta hace y la experiencia que se tenga en el diseño de fases, ya que esto puede disminuir el valor extra que genera la tecnología DBS.

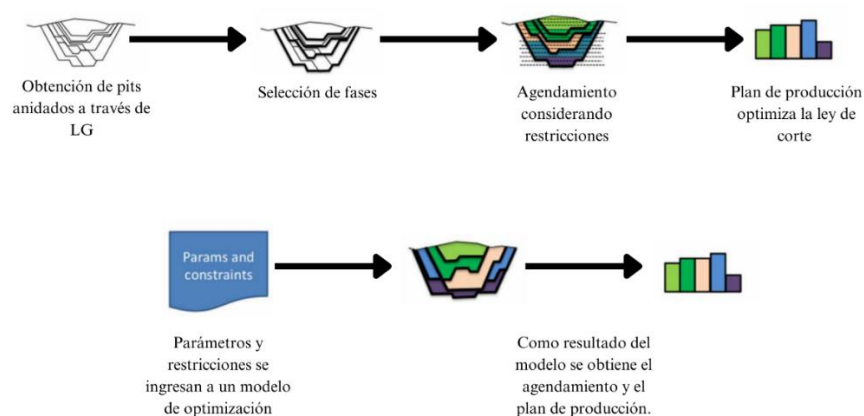


Figura 7: Comparativa metodología tradicional vs DBS. (Morales et al., 2015)

En la Figura 7, se muestra la comparativa entre las dos metodologías. Arriba, la metodología tradicional que se basa en el algoritmo de LG para generar pits anidados los cuales se utilizan como guía para la selección de fases y luego realizar el plan de producción. En la parte de abajo, la metodología DBS, donde todos los parámetros y restricciones se ingresan al modelo de optimización, donde la solución que se entrega es un agendamiento y un plan de producción. Se debe tener en consideración que, para el caso de la metodología tradicional, las restricciones deben ser consideradas por el planificador, mientras que en la metodología DBS la optimización no entrega soluciones que no considere todas las restricciones. (Morales, et al., 2015).

2.4 Planificación integrada

La planificación integrada nace a raíz de las deficiencias que presenta la metodología tradicional y el uso de nuevas tecnologías como el DBS, y donde se pretende obtener planes que cumplan de mejor forma con los objetivos de corto y mediano plazo en los primeros años de operación. Proporcionando un plan minero integrado, donde en una sola optimización se reúnan los periodos con un soporte de tiempo variable el cual debe considerar la planificación de corto, mediano y largo plazo. Y en vez de definir un soporte de tiempo anual para la elaboración de un plan minero, este se realice mediante la tecnología DBS y un soporte de tiempo de meses para el corto plazo, trimestre y semestres para el mediano plazo y años y paquetes de años para el largo plazo.

La construcción de un plan LoM integrado tiene por objetivo combinar los aspectos de los planes de corto, mediano y largo plazo, y se basa en tres fundamentos:

1. El primero punto trata sobre la falla de los promedios, el cual afirma que “los planes que se basan en la suposición de que las condiciones promedio siempre se cumplirán suelen ser incorrectos” (Savage, 2000).

En general, el uso de los promedios puede ser útil en muchos contextos, pero también puede llevar a errores cuando se aplican de manera inapropiada o en situaciones específicas por diferentes razones como, por ejemplo:

- Los promedios pueden verse afectados por valores atípicos o extremos en un conjunto de datos.
- Si los datos presentan una distribución asimétrica, están sesgados hacia un extremo, el promedio puede no ser una medida representativa de estos datos.
- En algunos casos los promedios pueden ocultar cambios o tendencias a lo largo del tiempo. Si los datos varían significativamente en diferentes periodos de tiempo, el cálculo del promedio puede suavizar las fluctuaciones y perder información valiosa sobre variaciones temporales.
- Cuando se tienen grupos de datos heterogéneos, donde calcular el promedio para todo el conjunto puede ocultar diferencias significativas entre los datos.

Por estas razones es importante considerar el contexto y las características de los datos antes de aplicar el promedio como medida descriptiva o para tomar decisiones.

Esto se puede retratar con ejemplos más cercanos a la realidad de todos, y tal como lo retrata el antipoeta Nicanor Parra “ Hay dos panes. Usted come dos, Yo ninguno. Consumo promedio: un pan por persona”. O incluso, cuando se habla de la lluvia promedio anual, cuando es de conocimiento común que existen meses donde la acumulación de lluvia es casi nula.

Esto mismo ocurre en el área financiera, donde existen situaciones donde el uso de promedios se vuelve erróneo. Al momento de calcular tasas de interés o rendimientos, si se promedian las tasas de interés de diferentes préstamos sin considerar la duración de cada uno, se podría subestimar el costo real de la deuda, algo similar a lo que ocurre si al calcular el rendimiento promedio de inversiones, no se tiene en cuenta la volatilidad o el riesgo asociado que podría llevar una evaluación inexacta del desempeño.

En la industria minera existen situaciones en las que el uso de promedios podría no ser adecuado. Un ejemplo de esto, puede ser la estimación de reservas minerales, lo cual implica la determinación de la cantidad de mineral recuperable en un yacimiento. Utilizar el promedio de valores de ley mineral en todo el yacimiento puede subestimar o sobreestimar la cantidad real de mineral disponible. En lugar de esto, se utilizan métodos más robustos como el kriging o la estimación geoestadística para considerar la variabilidad espacial de los depósitos minerales.

Como ejemplo, existen compañías mineras donde el ciclo de planificación tradicional las etapas van desde una visión estratégica Resource Development Plan (RDP), pasando por un plan de largo plazo (o Life of Mine), luego una visión de mediano plazo o (five year plan) y posteriormente el plan operativo o de corto plazo (mensuales trimestrales). Los planes RDP alimentan al LoM, y este al 5YP, y este último al OP. En este contexto, debido a que el grado de detalles va avanzando en la medida que se encuentra el camino a desarrollar, existen desviaciones que se pueden generar entre un plan y otro. Por ejemplo, el LoM tiene por lo general periodos anuales, y le entrega la directriz de que puede lograr 100 kt CuF para el

primer año siguiendo una determinada secuencia. Dependiendo de las características de la mineralización del yacimiento, suelen existir desviaciones entre el LoM y los planes mensuales. Por ejemplo, los espacios mínimos operativos de los equipos pueden provocar disminuciones en los rendimientos esperados en el LoM, lo cual puede dificultar el cumplimiento de la meta de CuF. Por otra parte, los planes mensuales pueden requerir un mayor número de equipos para lograr la meta productiva, lo que afectaría directamente a otros sectores productivos que se necesitan en periodos posteriores. La consecuencia es que al siguiente año no se podrá lograr la producción, o bien se requerirá de equipos adicionales, o ambas, lo que se traduce en que el plan LoA ya no tiene soporte porque las condiciones cambiaron.

Al hacer el plan integrado, la incertidumbre de lograr el plan es más acotada ya que para los primeros periodos, el plan fue desarrollado integrando la visión táctica y operativa necesaria en los planes de mediano y corto plazo.

A partir de esto, se puede argumentar que el uso de promedios dificulta la gestión de inversiones, la planificación de producción y otros planes.

2. El segundo fundamento se relaciona con la tecnología DBS, que corresponde a la única herramienta que, hasta el momento, tiene la capacidad de asignar continuamente áreas más valiosas disponibles en la mina a cada uno de los periodos en los que se desglosa el plan de mina a cielo abierto (Camus J., 2023). Esta herramienta ha demostrado ser beneficiosa para mejorar la planificación minera en aspectos como:

- Optimizar la secuencia de extracción, identificando la secuencia optima de extracción de bloques considerando diversos criterios, como calidad de mineral, costos de extracción y restricciones operativas. Con la utilización de algoritmos y modelos matemáticos modernos, permite analizar diferentes escenarios y obtener la secuencia de extracción que es más rentable y eficiente.
- Maximizar la recuperación de mineral, realizando una interacción entre bloques que son adyacentes y al mismo tiempo maximizando la

recuperación global del mineral cuando se define la secuencia de extracción óptima. A diferencia de lo que se hace en la metodología tradicional, donde se realiza la extracción de bloques secuencialmente, sin considerar de qué forma influye está en la recuperación total del mineral.

- Reducir costos y con esto mejorar la eficiencia. Esto ocurre a causa de la optimización de la secuencia de extracción de bloques, lo cual ayuda a reducir los costos operativos al minimizar el trayecto de equipos y del recurso en caso de que se asigne un costo de mina particular a cada bloque, evitando trayectorias innecesarias y optimizando el flujo de trabajo.
- Consideración de restricciones y objetivos específicos. Con la utilización de esta metodología es posible considerar restricciones adicionales, como lo son las restricciones operativas.

Antes de la metodología DBS, la optimización económica de los planes a corto, mediano y largo plazo no era factible. No obstante, con la llegada del DBS, se ha vuelto crucial aprovechar al máximo el valor que esta nueva tecnología proporciona.

3. El tercer punto se refiere a la importancia que tiene en la minería maximizar el valor de los recursos finitos no renovables. Para esto, se necesita un proceso de optimización dinámica a largo plazo para todo el recurso, lo cual da como resultado una ruta de extracción de recursos. La tecnología DBS es una herramienta que ayuda a hacer esto, pero puede resultar complejo comprenderla y cuál es la manera más efectiva de utilizarla para maximizar el valor potencial del recurso.

Ken Lane (1964) desarrolló una fórmula que permite calcular el valor económico del recurso extraído, considerando los ingresos y el costo de extracción. Este algoritmo es una técnica de optimización que se utiliza para determinar la secuencia optima de extracción de bloques de mineral, basándose en la maximización del VAN.

Este es un método iterativo que comienza con una ley de corte inicial y luego alista la ley de corte en cada iteración con el objetivo de maximizar el VAN. Este

proceso continúa hasta que se alcanza un VAN máximo o se cumplen las restricciones operativas y geotécnicas.

En resumen, este fundamento basado en la economía minera asegura que existe una única forma de extraer los recursos para maximizar su valor, y que la optimización debe realizarse para todo el producto y no solo una parte, o un periodo.

Esto es lo que realiza el plan integrado LoM: una forma de optimizar la extracción de recursos de manera que se maximice su valor en el largo plazo, pero integrando las particularidades de los horizontes de mediano y corto plazo, para asegurar su factibilidad.

3. Metodología

Para este estudio, se analizan dos casos de estudio. A continuación, se presenta la metodología a modo general y posteriormente se detalla la metodología para cada uno de los casos a estudiar.

1. Se realizará el proceso de validación de datos, y análisis de la información base para cada caso de estudio.
2. Se estudiarán posibles ventajas del algoritmo DBS al incorporar periodos de tiempo de distinta magnitud que se relacionen con los horizontes de corto, mediano y largo plazo. Esto se contrastará con la metodología tradicional, donde los periodos son de igual longitud y acordes a un plan de largo plazo. Para este fin, se plantean los siguientes pasos:
 - a) Generación de plan de largo plazo con DBS y largo de periodos distintos, y generación de plan tradicional de largo plazo. Este paso solo se realizará para el Caso de Estudio 2, en el cual se estudia la posibilidad de agregar valor al plan minero agrupando los periodos en diferentes largos.
 - b) Operativización de resultados de ambos planes para generar diseños mineros factibles. Donde se considerarán las restricciones de diseño como lo son los anchos de rampas, la pendiente máxima de rampas, anchos de berma, entre otros.
 - c) Agentamiento de la producción para diseños operativizados. Con la herramienta MPSO del software MineSight se realizará la programación del plan minero que maximice el valor económico.

3. En base a los resultados obtenidos se realizará una comparativa de KPI's relevantes a la planificación minera: FCA, FCAD, saturación de capacidad de producción, cumplimiento de las metas en los distintos horizontes.

3.1 Metodología Caso de estudio 1

1. Revisión de modelos de entrada, donde se incluye la topografía inicial. Modelo de recuperación metalúrgica, modelo de costos para asignar a los bloques y el modelo de evaluación económica del plan minero.
2. Valorización del modelo de bloques, para los diferentes escenarios que se presentaran en el software SimSched DBS.
3. Análisis del efecto de agrupar los bloques individuales del modelo de bloques, actividad que se conoce como re-bloqueo.
4. Diseño de fases de explotación, los cuales se realizarán utilizando como guía los resultados del software SimSched DBS.
5. Confección del plan minero con el uso de la aplicación Mine Plan Schedule (MPSO) de Hexagon_Mining.
6. Comparación de los principales indicadores del plan minero como flujo de caja y movimiento mina con el caso base, que utiliza la metodología tradicional.

3.2 Metodología Caso de estudio 2

Este caso de estudio se basa en la metodología de optimización de planificación integrada.

1. Revisión de modelos de entrada, donde se incluye la topografía inicial. Modelo de recuperación metalúrgica, modelo de costos para asignar a los bloques y el modelo de evaluación económica del plan minero.
2. Análisis del efecto de agrupar los bloques individuales del modelo de bloques, actividad que se conoce como re-bloqueo.
3. Valorización del modelo de bloques, para los diferentes escenarios que se presentaran en el software SimSched DBS.

4. Utilizando DBS, se definieron periodos de tiempo variable para integrar los distintos tipos de planificación minera, corto, mediano y largo plazo, y realizar una optimización de estos simultáneamente. Para lo cual se fraccionó la optimización DBS en periodos mensuales, trimestrales, semestrales, para los primeros años del plan, y luego, a partir del cuarto año en adelante, definir periodos anuales y paquetes de años. Donde se considerarán los periodos de tiempo como:
 - Año 0: 6 mensuales
 - Año 1: 12 mensuales
 - Año 2: 2 trimestres y 1 semestre
 - Año 3: 2 semestres
 - Año 4: anuales y paquetes de año hacia adelante.
5. Diseño de fases operacionales que permitan operativizar el plan computacional optimizado que brinda DBS. Para esto se considerarán polvorazos para el corto plazo, bancos y fracciones de banco para el mediano plazo, y fases para el largo plazo.
6. Confección del plan minero con el uso de la aplicación Mine Plan Schedule (MPSO) de Hexagon Mining, utilizando los diseños operacionales con la finalidad de crear un plan minero optimizado de corto, mediano y largo plazo.
7. Comparación de los principales indicadores del plan minero como flujo de caja y movimiento mina con el caso base, que utiliza la metodología tradicional.

4. Resultados

4.1 Caso de estudio 1: Metodología tradicional vs DBS

El estudio se realizó en una minera ubicada en Chile, con el objetivo de analizar la posibilidad de avanzar con un trabajo exploratorio de planificación minera realizado anteriormente.

4.1.1 Información Inicial

- Topografía

La topografía inicial corresponde a la mostrada en la Figura 8.

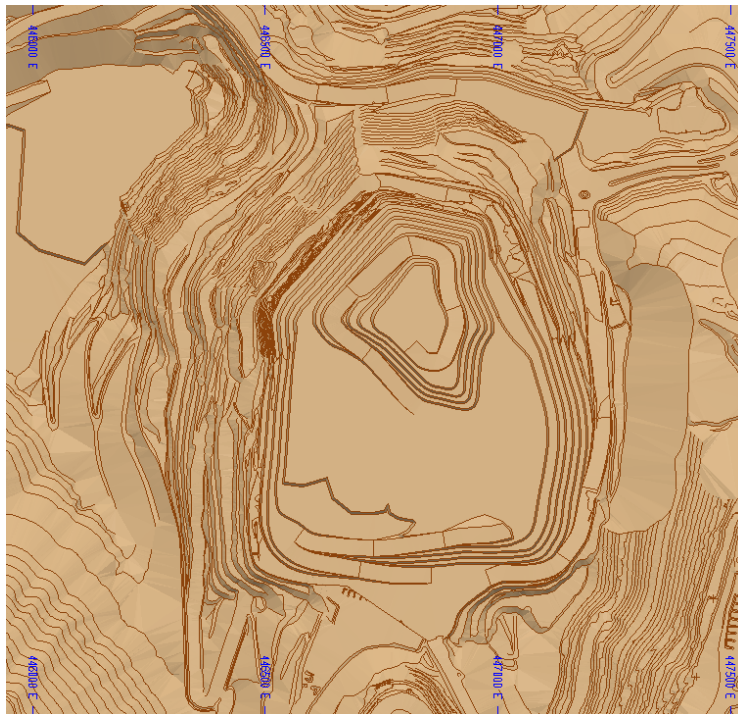


Figura 8: Topografía inicial Caso Base

- Modelo de bloques

El modelo de bloques a utilizar en este estudio contiene bloques de tamaño 20x20x25m y un número total de 1,800,000 bloques. Cada uno de ellos tiene asociado una serie de datos

que incluyen características espaciales, geológicas, geo-metalúrgicas, entre otras. Las cuales, en conjunto con los parámetros técnico-económicos, permiten atribuirle un valor económico a cada uno de estos bloques.

En la Tabla 1 se muestra el tamaño y extensión del modelo de bloques utilizado.

Tabla 1: Información modelo de bloques

Dirección	Min.	Máx.	Tamaño bloque (m)	Nº de bloques
X (columnas/i)	0.000	2400.000	20.000	120.000
Y (filas/j)	0.000	3000.000	20.000	150.000
Z (elevación/k)	0.000	1500.000	15.000	100.000

- Cubicación del modelo de bloques

En la Tabla 2, se muestra la cubicación a diferentes leyes de cortes para el modelo de bloques utilizado en este proyecto según categoría.

Tabla 2: Cubicación MB según categoría

CATEGORÍA	CutOff	Tonelaje (kt)	CuT (%)	Mo (ppm)	CuS(%)
MEDIDOS	0.0	788,358	0.36	122.86	0.24
	0.1	741,961	0.38	125.06	0.25
	0.2	661,959	0.41	129.01	0.27
	0.3	488,128	0.46	134.68	0.32
	0.4	270,608	0.55	134.60	0.41
	0.5	135,593	0.66	137.40	0.52
INDICADOS	0.0	1,493,173	0.22	86.63	0.09
	0.1	1,213,641	0.25	94.20	0.11
	0.2	794,321	0.31	106.77	0.13
	0.3	334,445	0.39	124.26	0.18
	0.4	108,483	0.48	131.77	0.25
	0.5	31,980	0.58	130.11	0.31
INFERIDOS	0.0	4,126,699	0.09	38.69	0.03
	0.1	1,395,933	0.18	75.45	0.04
	0.2	467,270	0.26	100.83	0.05
	0.3	91,839	0.35	138.09	0.06
	0.4	9,039	0.42	164.88	0.12
	0.5	341	0.56	162.98	0.27
TOTAL	0.0	6,408,230	0.16	60.22	0.07
	0.1	3,351,535	0.25	93.22	0.11
	0.2	1,923,550	0.33	112.98	0.16
	0.3	914,412	0.42	131.21	0.24
	0.4	388,130	0.53	134.51	0.36
	0.5	167,914	0.64	136.07	0.48

- Parámetros técnicos y económicos

En la Tabla 3 se muestran los parámetros técnico-económicos entregados por el mandante, para ser utilizados en la optimización y en la valorización de los planes mineros generados.

Estos parámetros incluyen costos de operación, gastos generales y de administración, precios y costos de venta, como también recuperaciones metalúrgicas.

Tabla 3: Parámetros técnico-económicos.

Área	Ítem	Unidad	Valor
Mina	Costo Fijo Mina	US\$/t	0.84
	Costo Variable Lastre	US\$/t	Variable en modelo
	Costo Variable Dump Leaching	US\$/t	Variable en modelo
	Costo Variable Concentradora	US\$/t	Variable según modelo
Proceso	Costo Fijo Concentradora	US\$/t	3.5
	Costo Variable Concentradora	US\$/t	4.91
	Costo Fijo Dump Leaching	US\$/t	0.53
	Costo Variable Dump Leaching	US\$/t	0.877
Costo de Venta Productos	Costo Fijo Concentradora	US\$/lb	0.46
	Costo Fijo Dump Leaching	US\$/lb	0.46
	Costo Venta Concentradora	US\$/lb	0.5
	Costo Venta SX-EW	US\$/lb	0.28
	Costo Venta Molibdeno	US\$/lb	1.76
Precio de Venta Productos	Precio Cobre Concentrado	US\$/lb	3
	Precio Cobre SX-EW	US\$/lb	3.02
	Precio Molibdeno	US\$/lb	8.5
Tasa de Descuento		%	9.5
Recuperaciones	Cobre Concentradora	%	Variable en modelo
	Molibdeno Concentradora	%	Variable en modelo
	Cobre Dump Leaching	%	Variable en modelo

4.1.2 Modelamiento DBS

Se realizó una agrupación de bloques, desde un tamaño original de 20x20x15m, a uno de 40x40x30m.

Como resultado del DBS se obtuvieron los periodos mostrados en la Figura 9, desde el periodo 4 en adelante se agrupan por color.

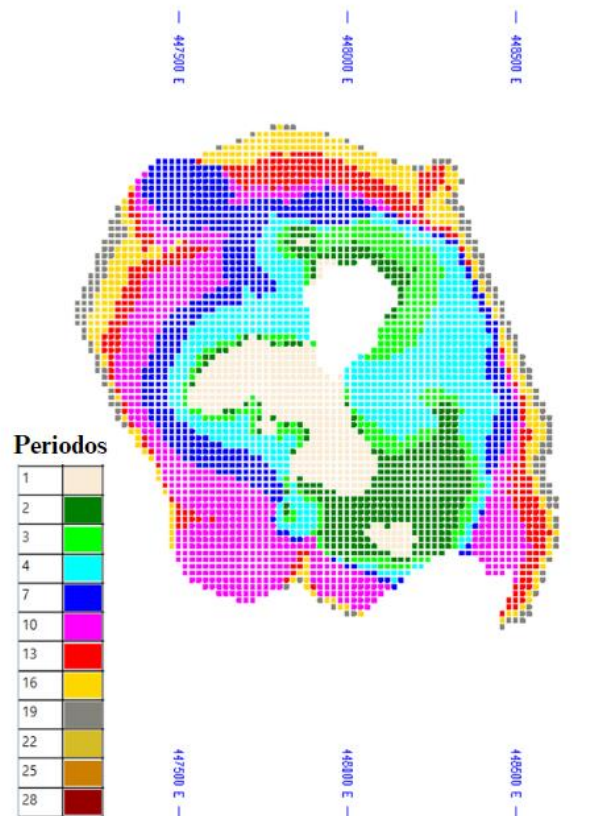


Figura 9: Periodos DBS

4.1.3 Diseño de fases

Se realizó el diseño de 11 fases, las cuales se muestran en la Figura 10 y la Figura 11.

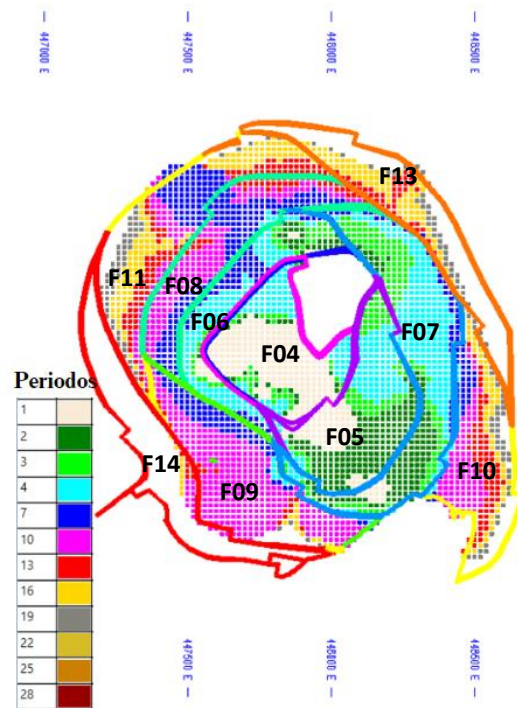


Figura 10: Elección de Fases DBS (cota 4160).

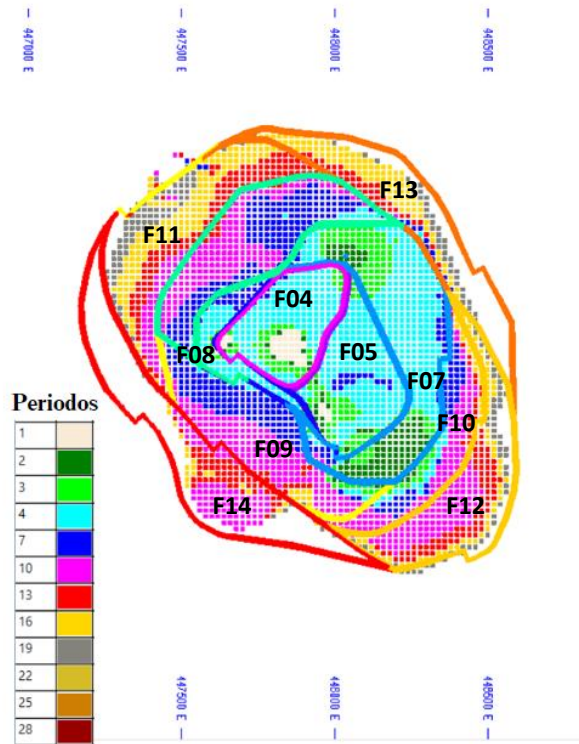


Figura 11: Diseño de fases (cota 4100)

4.1.4 Optimización de planes mineros MPSO

En base a los resultados de las fases obtenidas se desarrolló el siguiente plan minero, cuyos resultados se muestran en la Figura 12, con la herramienta MPSO.

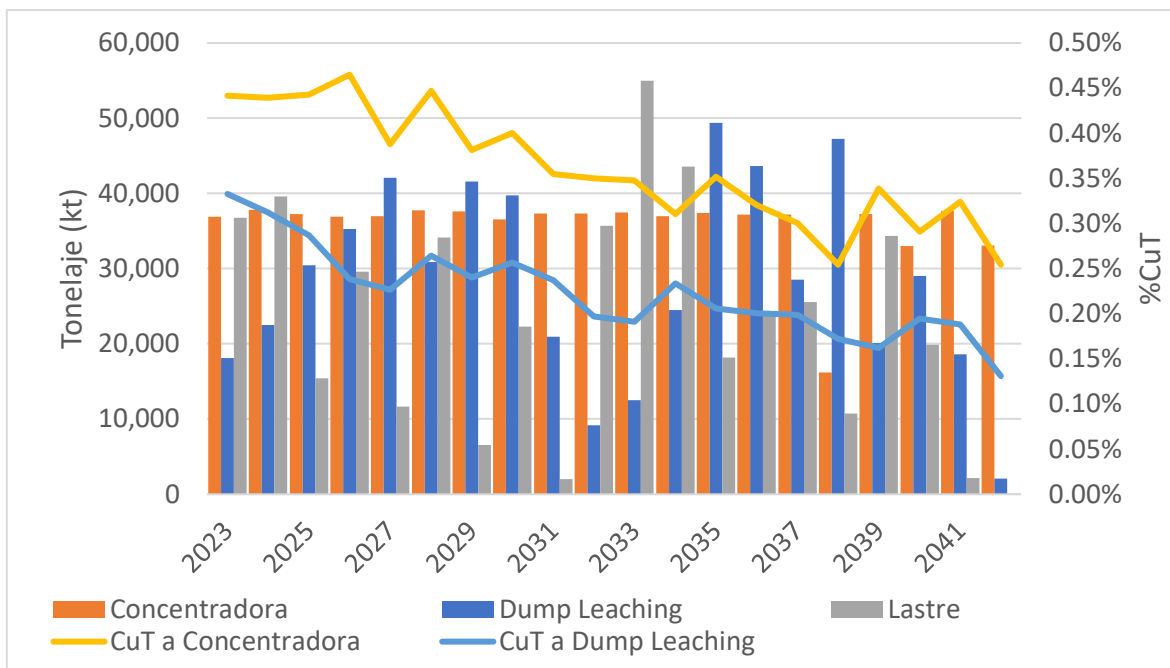


Figura 12: Gráfico Extracción mina

La evaluación económica asociada al plan de producción propuesto se muestra en la Figura 13:

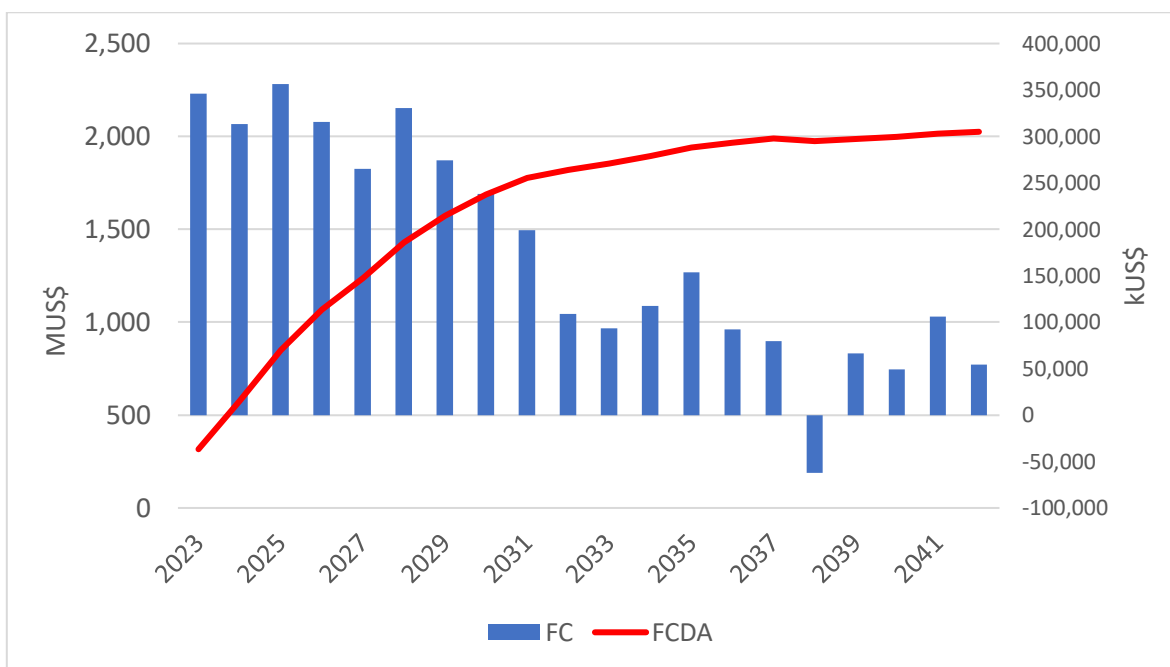


Figura 13: Flujo de Caja Descontado Acumulado.

5. 4.2 Caso de estudio 2: Metodología tradicional vs Planificación Integrada

Este caso de estudio se realizó en base a una mina de cobre en Chile, con el objetivo de probar la planificación integrada, la cual considera la planificación de corto, mediano y largo plazo.

4.2.1 Información Base

- Topografía

La topografía inicial corresponde a la mostrada en la Figura 14.

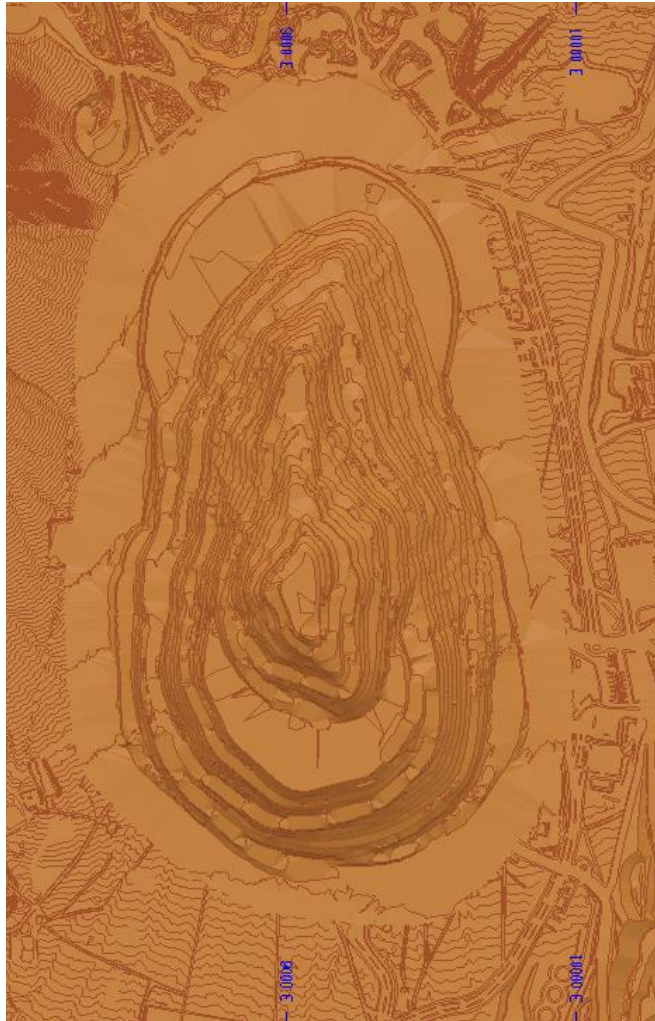


Figura 14: Topografía inicial

- Modelo de Bloques

El modelo de bloques a utilizar contiene 7.661.740 bloques, de tamaño 10x15x15m, y cada uno de estos bloques tiene asociadas diversas variables.

La información del modelo de bloques y su longitud se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4: Información Modelo de bloques

Dirección	Min	Max	Block size (m)	Block count
X (columns/i)	7500	10520	10	302
Y (rows/j)	22465	26900	15	295
Z (levels/k)	1200	2490	15	86

- Parámetros técnicos y económicos

En la Tabla 5, se muestran los principales parámetros técnicos y económicos utilizados en la evaluación del yacimiento.

Tabla 5: Principales parámetros económicos

Ítem	Unidad	Valor
Costo Mina Referencia	US\$/th	2.22
Costo Remanejo	US\$/th	1.08
Humedad in situ	%	3.5
Costo Conc.	US\$/t	10.29
Costo Venta Cu Conc.	US\$/lb	0.56
Costo Tostación	US\$/lb	0.28
Costo G&A	US\$/lb	0.119
Precio Cu	US\$/lb	3.1
Precio Ag	US\$/oz	19
Tasa de Descuento	%	8

4.2.2 Modelamiento DBS

Se realizó una agrupación de bloques, desde un tamaño original de 10x15x15m, a uno de 20x20x30m.

Como resultado de la metodología DBS donde se utilizaron periodos de tiempo variable como se mencionó anteriormente, se obtuvo la secuencia mostrada en la Figura 15.

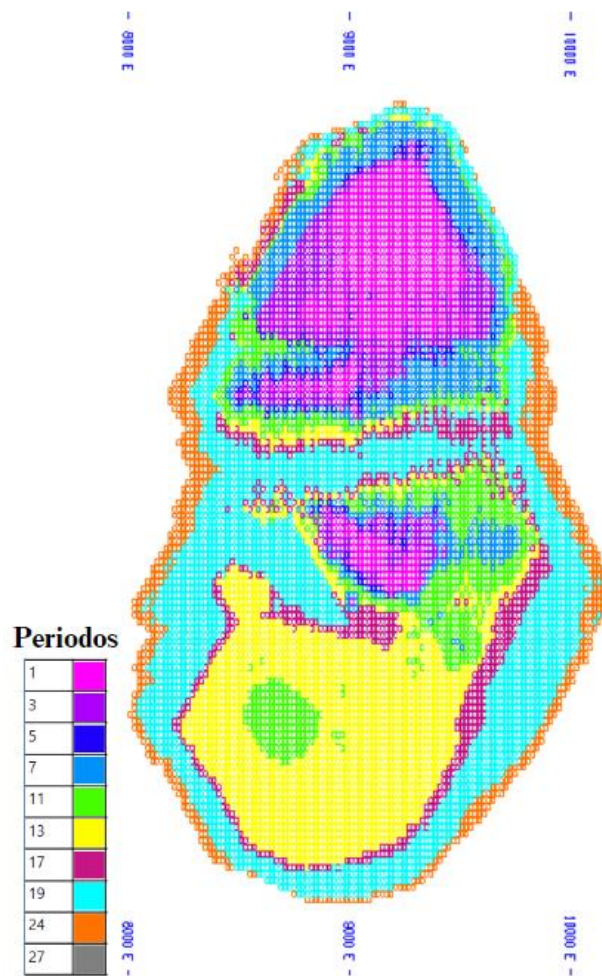


Figura 15: Periodos DBS

4.2.3 Diseño de fases

Se realizó el diseño de 10 fases, como se muestra en la Figura 16.

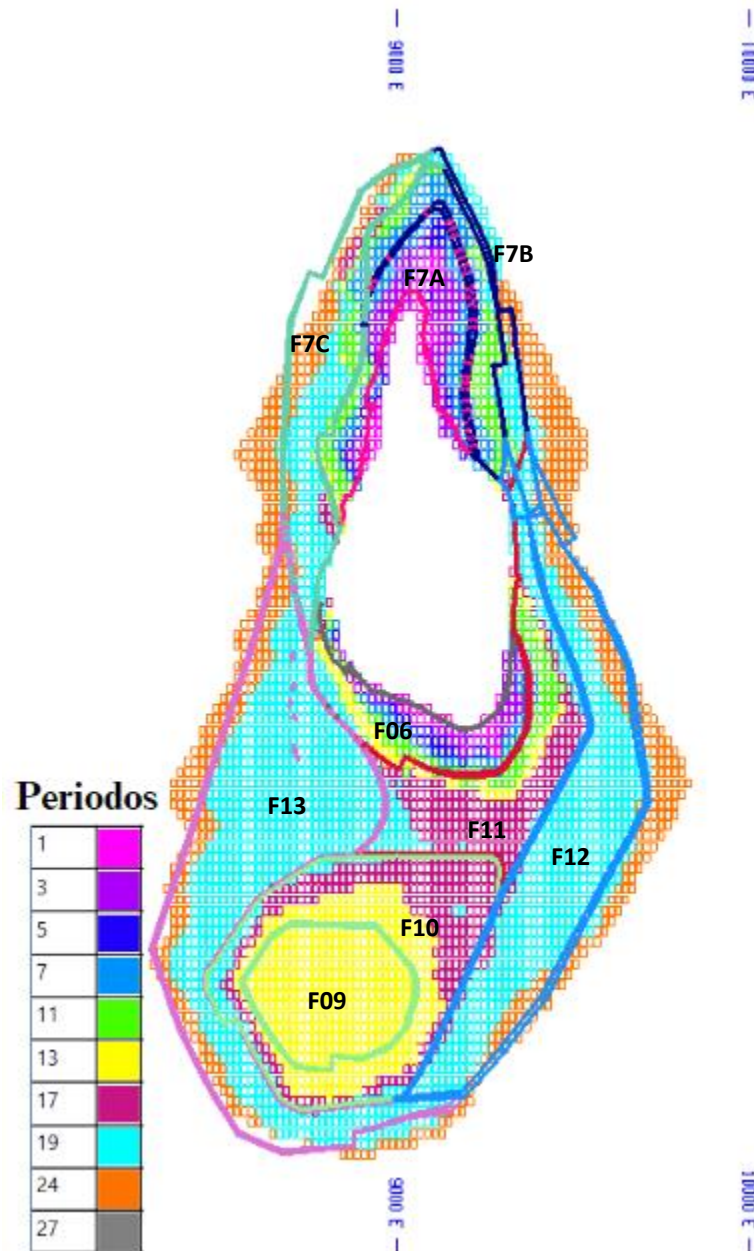


Figura 16: Secuencia Fases cota 2085.

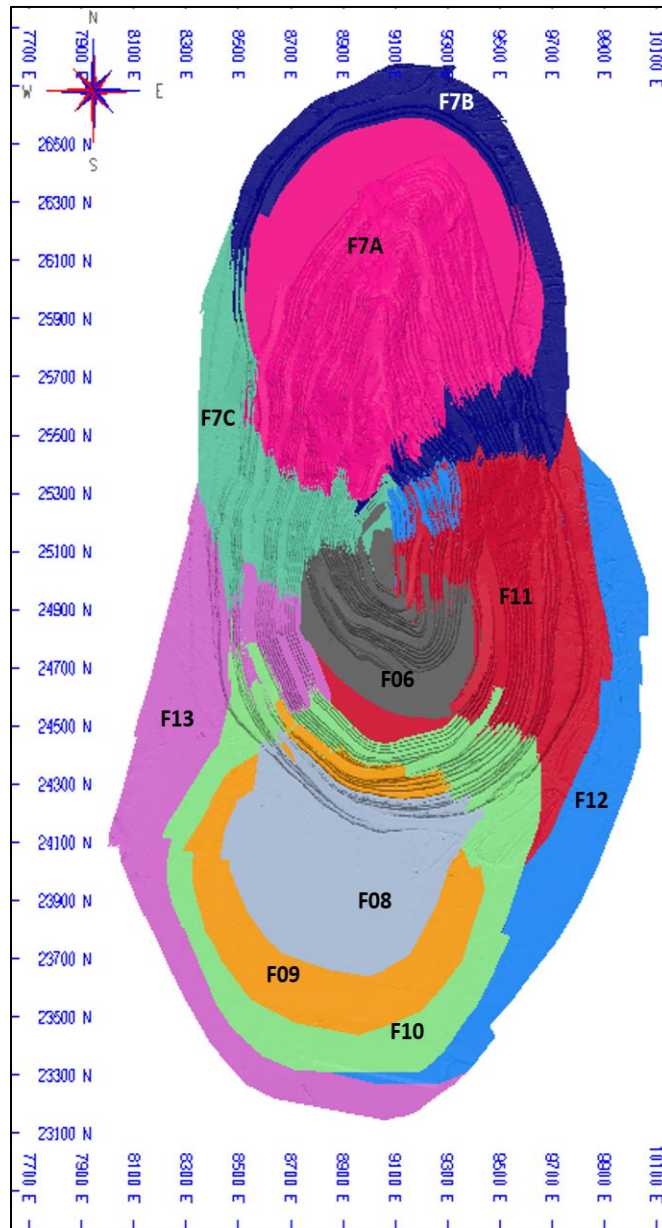


Figura 17: Vista general diseño.

4.2.4 Plan minero MPSO

Al finalizar la etapa de diseño de fases, se programaron los tiempos de extracción y mezcla de este set de fases. Obteniendo como resultado un plan, cuya grafica resumen se muestra en la Figura 18.

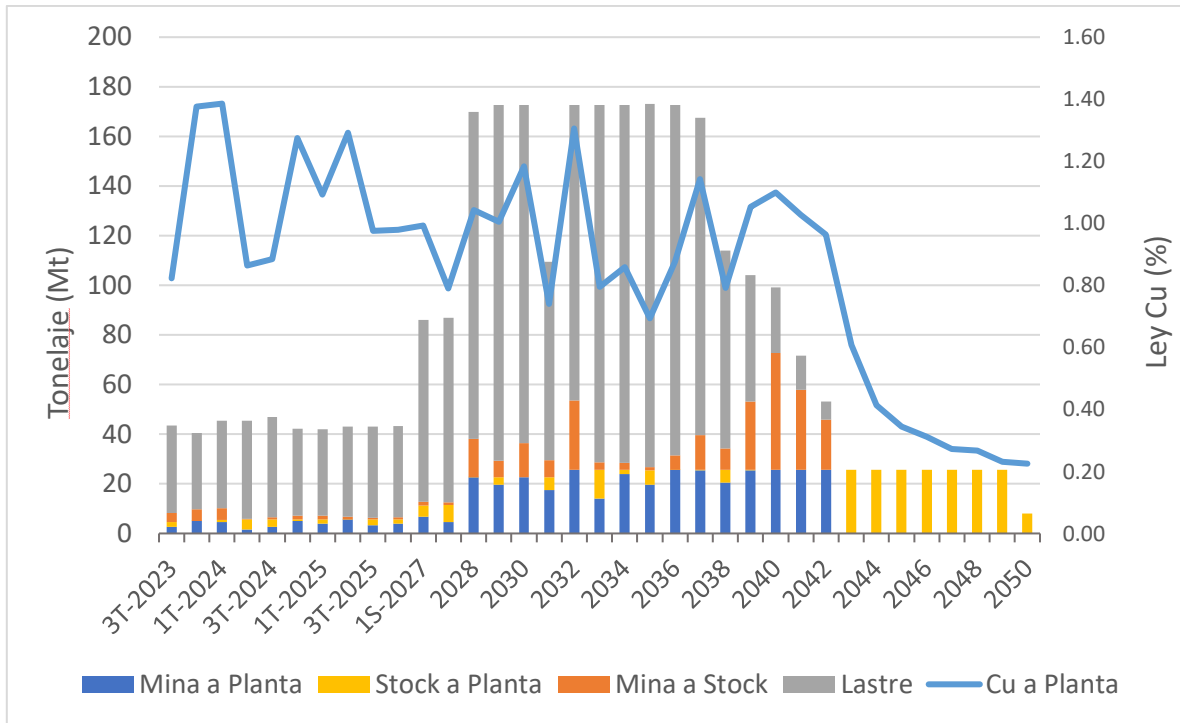


Figura 18: Gráfico Extracción mina

La evaluación económica asociada al plan de producción propuesto se muestra en la Figura 19:

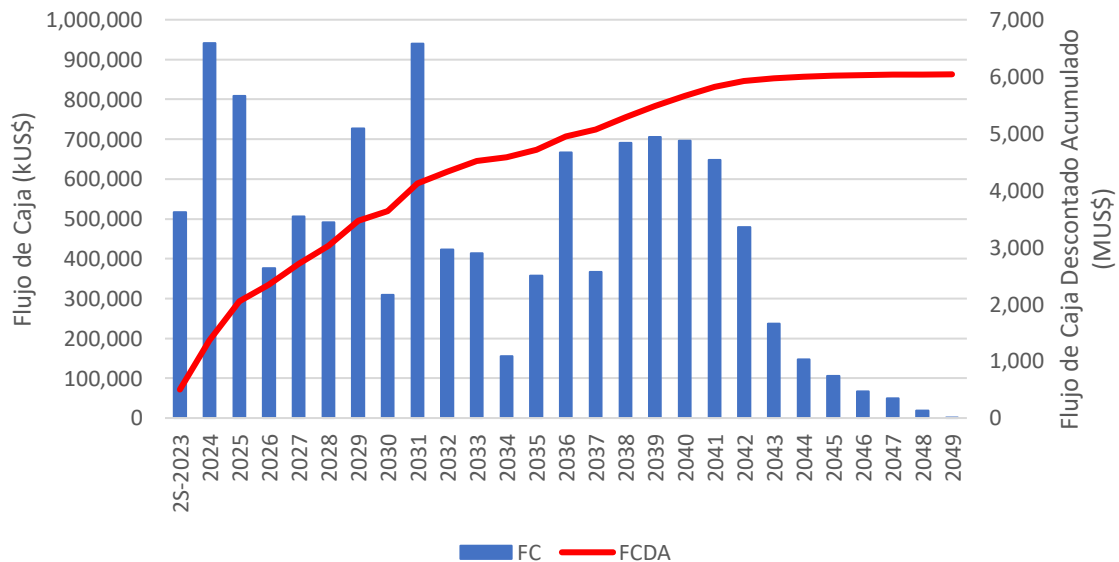


Figura 19: Flujo de Caja Descontado Acumulado.

5. Análisis de Resultados

- Secuencia DBS

Para el Caso de Estudio 1, respecto a la comparación de la secuencia vigente con la secuencia obtenida por la herramienta DBS. La Figura 20 superpone las líneas correspondientes a los diseños del caso vigente con el modelo de bloques desplegado de acuerdo a los periodos de minado del plan DBS, pudiendo observar que dicha optimización modifica los diseños vigentes, mostrando que:

- El periodo 01 (color beige) toma gran parte de la actual Fase F04 y parte sur de la F05
- El periodo 02 (color verde oscuro) toma parte SE de la Fase F05 y parte de la Fase F07
- El periodo 03 (color verde claro) toma la parte norte de la actual Fase F03 y parte de la Fase F06
- Los periodos 04 al 06 (color cian) toman gran parte de los remanentes de la Fase F04-F05 y en forma parcial las Fases F06-F07-F08
- Los periodos 07 al 09 (color azul) toma principalmente el sector ubicado al noroeste de la Fase F06 y parte oeste de la Fase F08
- El resto de los colores se va abriendo en diferentes sectores de la mina a medida que transcurren los años

Se puede observar que la Fase F04, hoy en producción, muestra que su ubicación es la correcta, y que las Fases F05 y F06 es una mezcla de periodos pertenecientes al primer quinquenio, lo que podría ser acertado. Sin embargo, el resto de las fases, que llegan a rajo final (F07-F08-F09), se muestran demasiado amplias, mezclando en forma no selectiva los periodos 7 en adelante, lo que probablemente hace perder un importante valor a la explotación minera.

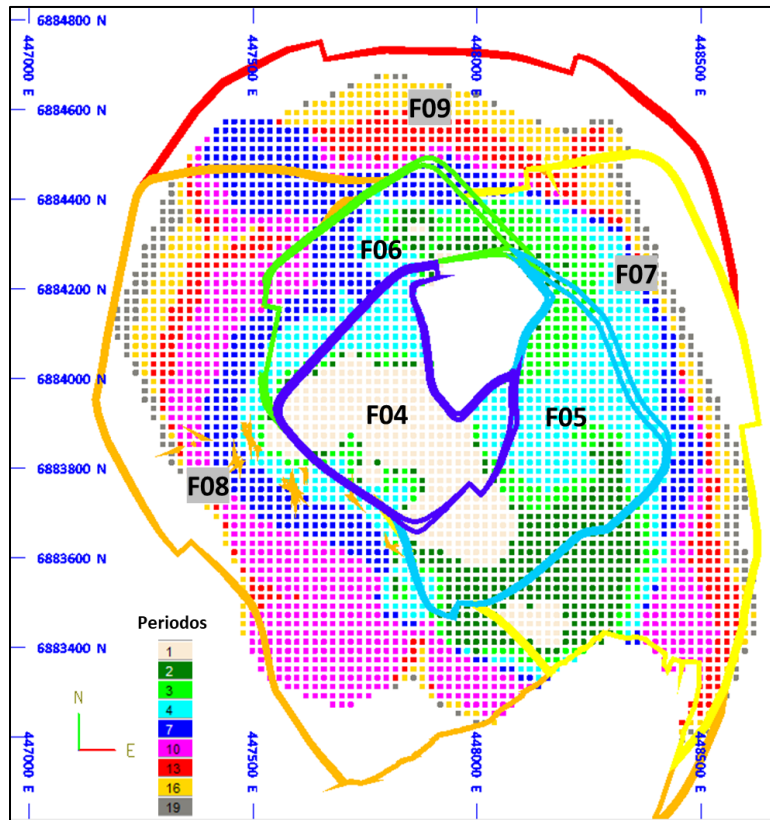


Figura 20: Comparación fases Caso Base vs secuencia DBS.

Con respecto al Caso de Estudio 2, como se muestra en la Figura 21 la Fase 06 que se encuentra actualmente en explotación muestra que el sector oeste de dicha fase debiese ser postergada, ya que posee color cian, que representa bloques de debiesen ser extraídos en la segunda década del plan.

Por el lado de la Fase 07A, se muestra que debiese ser extendida en sus dos puntas en dirección sur para capturar los bloques con colores magenta, púrpura y azul. Para esto, se necesitará adaptar los diseños de las fases 07B y 07C.

Por otro lado, se aprecia que la Fase 08, que continúa hacia el Sur, después de la Fase 06, se encuentra ubicada en una zona que la secuencia DBS extrae a partir del periodo 7, en la cota 2085. Al observar la cota 2325, que se muestra en la Figura 22, se visualiza que la optimización DBS extrae ese sector como un rajo semi-independiente del rajo actual, sugiriendo un rediseño de todas las fases que van en dirección sur.

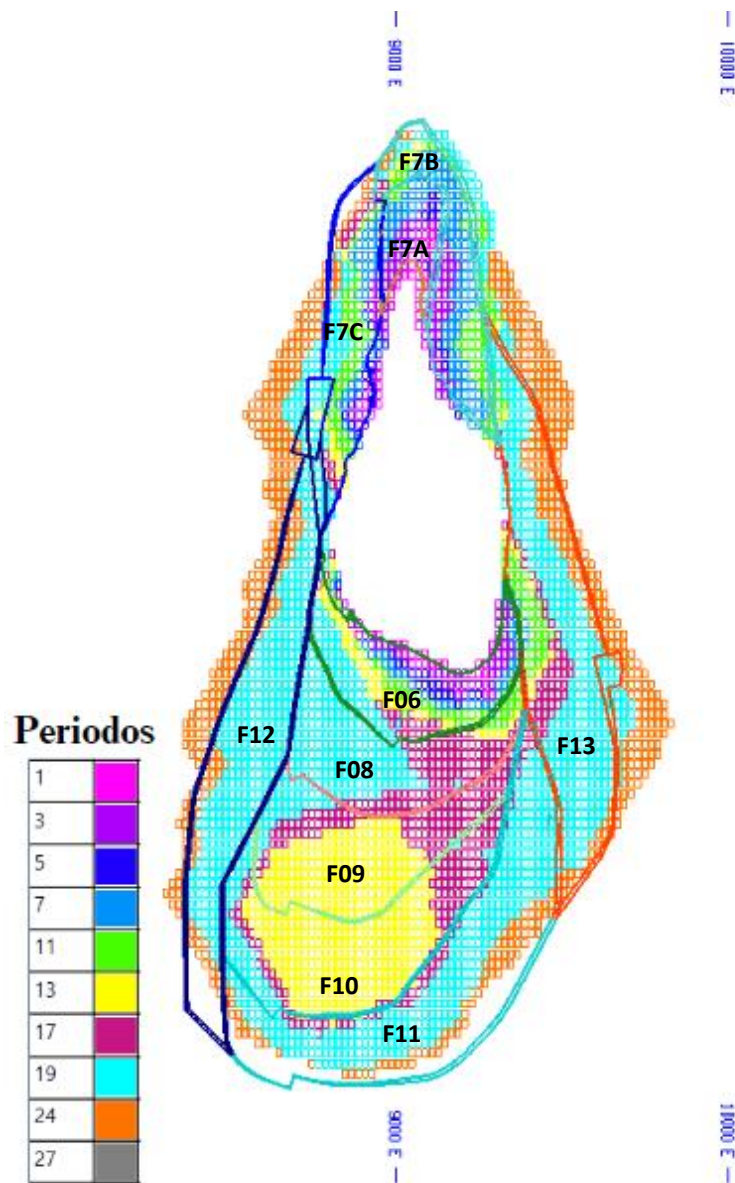


Figura 21: Comparación secuencia DBS vs Caso Base (z:2085)

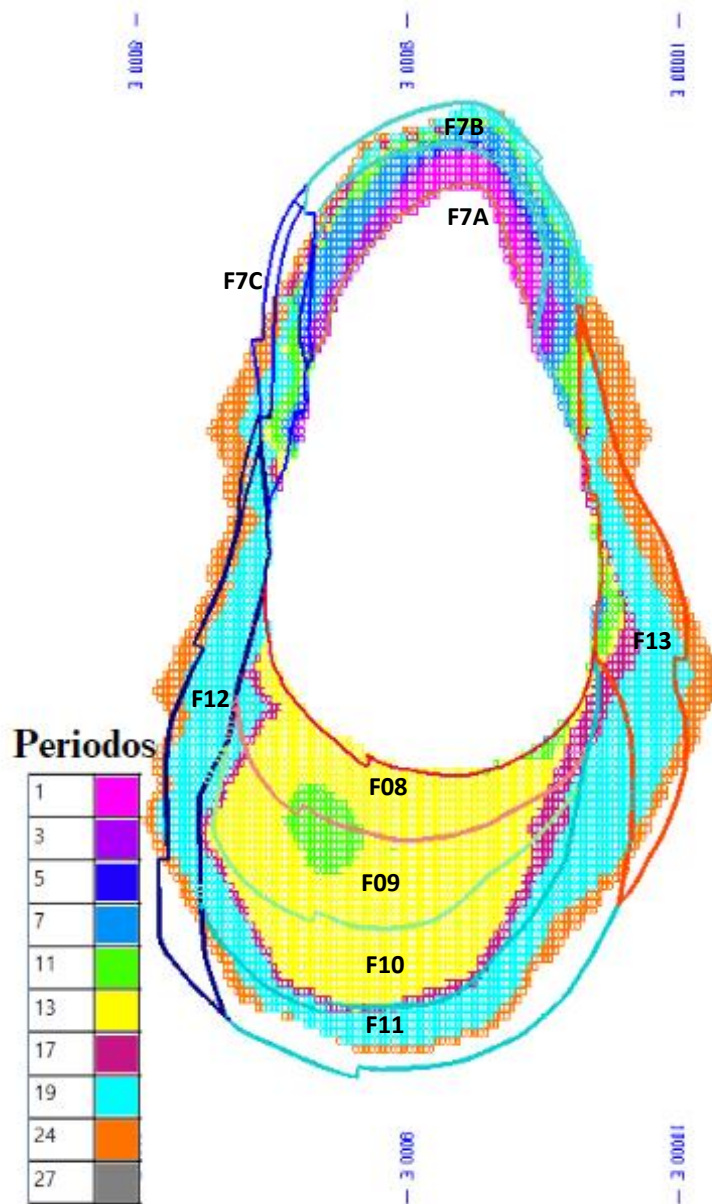


Figura 22: Comparación secuencia DBS vs Caso Base (z:2325)

- Geometría

Para el Caso de Estudio 1 el proceso de diseño de fases fue realizado considerando dos aspectos fundamentales. El primero, corresponde a la optimización de secuencia minera y rajo final obtenido a partir de la optimización DBS, y segundo, las consideraciones operacionales y geotécnicas necesarias para el diseño operacional de cada fase y sectores mina.

Como se muestra en la Figura 10 las fases iniciales son similares. Esto se debe a que la Fase F04 está en operaciones y que la Fase F05 y F06 están en etapas tempranas. Por lo que se mantuvo el diseño de la primera y se ajustaron las Fases F05 Y F06 para no complicar los actuales planes de corto y mediano plazo. Posteriormente la Fase F07 fue ajustada en su tamaño, no llegando al rajo final como los actuales diseños. Luego, la Fase F08 fue ubicada al norte de la Fase F06, la Fase F09 al suroeste, la Fase F11 llegando al fondo del rajo, en el sector noroeste. La Fase F12 que se muestra en la Figura 11, corresponde a un fondo dejado por la F10 debido a las indicaciones de la optimización. Posteriormente, las Fases F13 Y F14 llegan al rajo final en el sector noreste y suroeste, siendo estas fases evaluadas para ver si entregan o no aporte al plan minero.

Observando el Caso de Estudio 2 y como se muestra en la Figura 16, que representa la cota 2085, las fases 6 y 7A, las cuales se encuentran en producción, fueron acomodadas para lograr ajustarse de mejor manera los periodos entregados por la optimización DBS (colores magenta y azul). Estos cambios se traducen en una disminución del ancho de fases, minimizando la cantidad de lastre y extendiéndose a sectores que indica la optimización DBS, los cuales, generalmente corresponden a sectores de mejor ley.

Luego, el resto del diseño de fases continúa siguiendo la secuencia DBS, de acuerdo a la paleta de colores que corresponde a los distintos periodos de la optimización DBS. Como se observa en la parte sur del rajo existe un importante cambio, comparado con el ordenamiento de las fases del Caso Base.

- Plan de producción

Para el Caso de Estudio 1, la optimización del plan se realizó con las siguientes restricciones:

- Ritmo máximo mina: 105Mt/año
- Ritmo máximo Concentradora: 39Mt/año
- Capacidad máxima SX-EW: 32kt/año
- Ritmo por fase máximo: 60Mt/año

Como se puede observar en la Figura 12, se tiene una alimentación a concentradora constante exceptuando el año 2038. Mientras que el caso del Dump Leaching va variando durante los años y presenta un peak durante el año 2035 y 2038.

Como se muestra en la Figura 23, donde se realiza una comparación con la alimentación a concentradora del Caso Base y el Caso utilizando DBS, se puede observar que existe una disminución notoria en la alimentación a concentradora y el Cu recuperado.

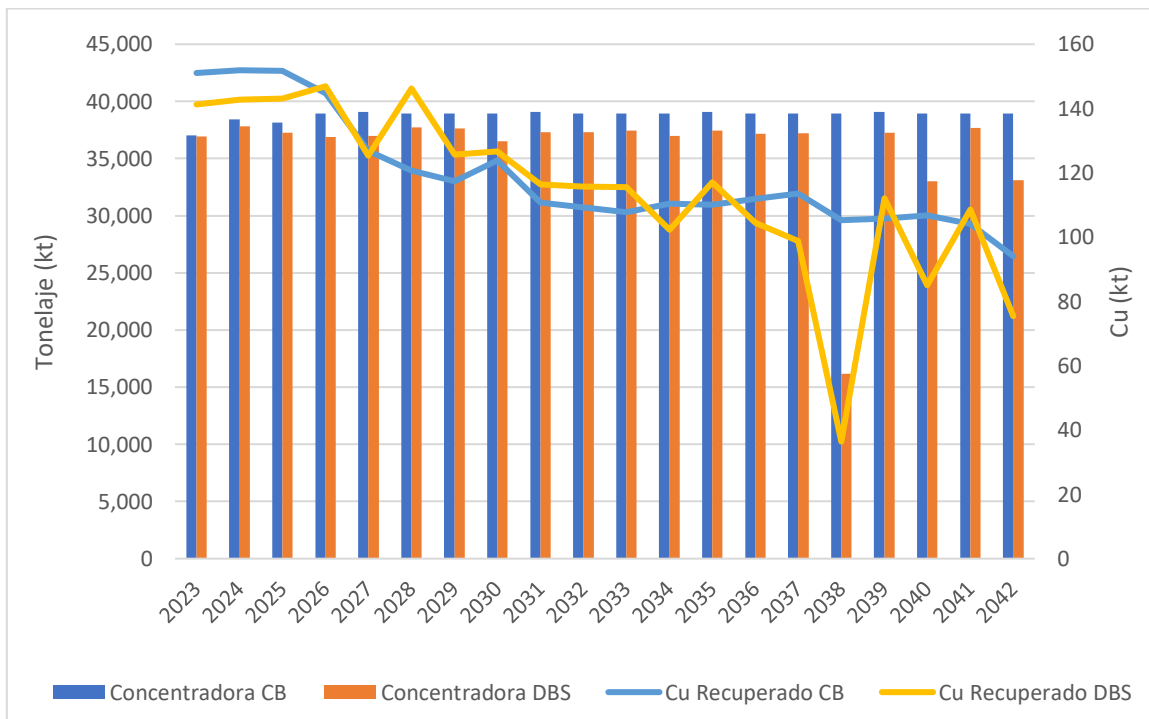


Figura 23: Alimentación Concentradora

Además, en la Figura 24, se muestra una comparación de la alimentación a Dump Leaching, se observa que el caso DBS tiene un ritmo de alimentación mayor durante todo el periodo, donde uno de los peak se presenta precisamente en el año 2038, pero presentando una baja cantidad de cobre recuperado.

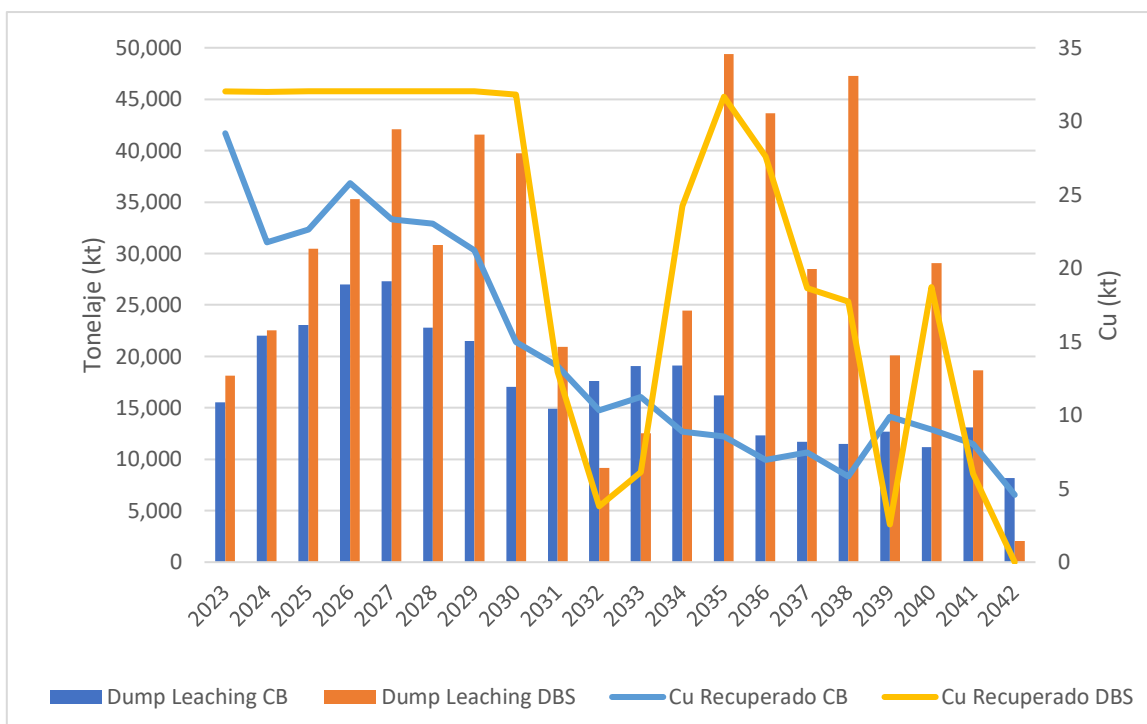


Figura 24: Alimentación Dump Leaching

Analizando ambos resultados, esto se puede asociar también con el resultado que se obtuvo en el Flujo de Caja, el cual en el año 2038 presentaba resultados negativos, lo cual se debe a que existe una menor cantidad de Cu recuperado en Concentradora y lo mismo ocurre en el caso de la Dump Leaching.

En el Caso de Estudio 2, se realizó la optimización del plan utilizando las siguientes restricciones:

- Movimiento mina máximo: 490kt/día
- Ritmos de fase: que no sobrepase Caso Base
- Capacidad planta: que no sobrepase Caso Base

Realizando una comparación se obtuvo el gráfico mostrado en la Figura 25:

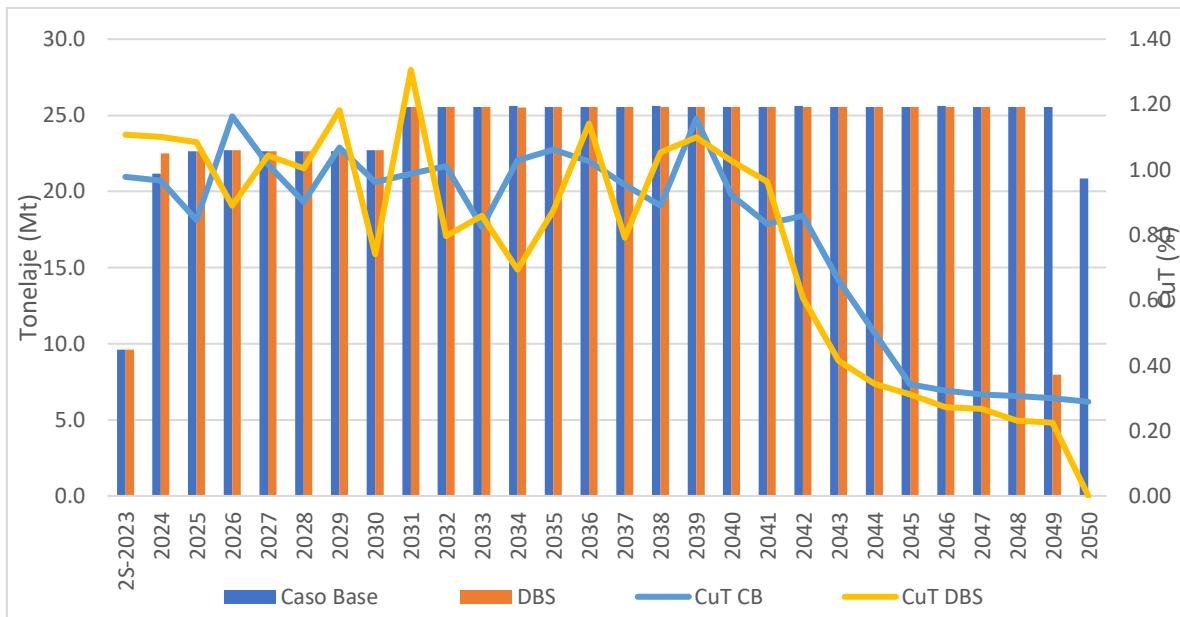


Figura 25: Comparación alimentación a planta

Como se observa en la Figura 25:, se destaca que como ocurría en el la Figura 19, en flujo de caja disminuía notoriamente en los años 2030 y 2034, y como se observa en el grafico de comparación de alimentación a planta, se puede atribuir que en estos años existe una disminución de la ley, la cual es provocada por la dilución que se genera por el mineral enviado desde el stock. En el caso del año 2034 se hace una mezcla de mineral que viene de la mina con ley promedio de 0.86 y con mineral que viene desde el stock que tiene una ley promedio de 0.47, lo que provoca una disminución de la ley enviada a planta de 0.69.

- Evaluación económica

En cuanto al plan de producción obtenido para el Caso de Estudio 1:

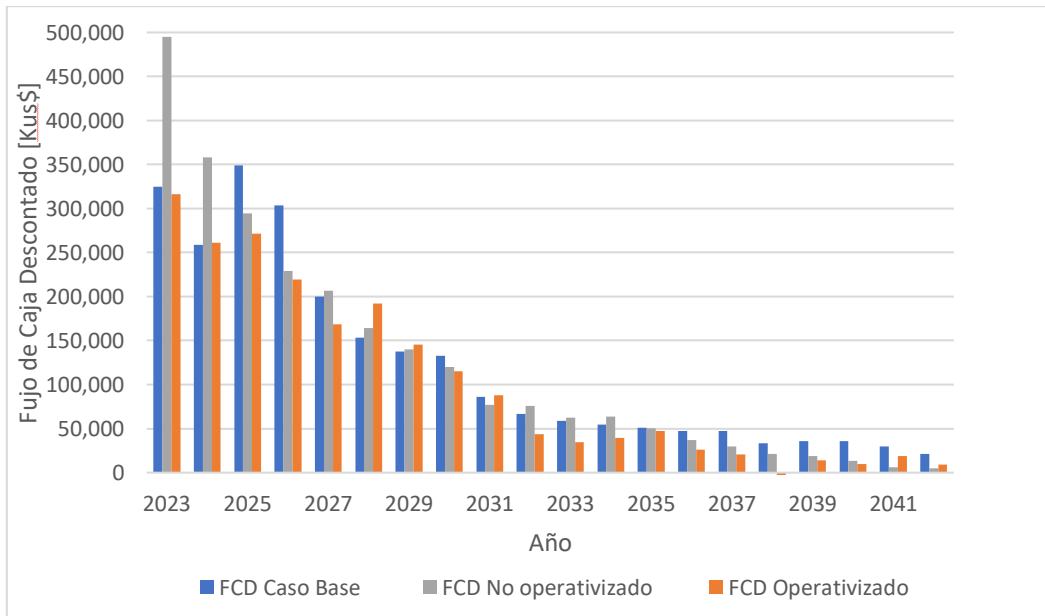


Figura 26: Gráfico FCD Caso de Estudio 1

Como se puede observar en la Figura 26, el flujo de caja descontado (FCD) alcanza su máximo durante los primeros años tanto para el plan que se obtuvo mediante el DBS y el plan optimizado con la herramienta MPSO. Esto se debe a que la optimización DBS tiende a explotar las zonas con mayor valor al inicio del plan. Y esto, tiene como consecuencia que el plan optimizado por MPSO siga el mismo comportamiento.

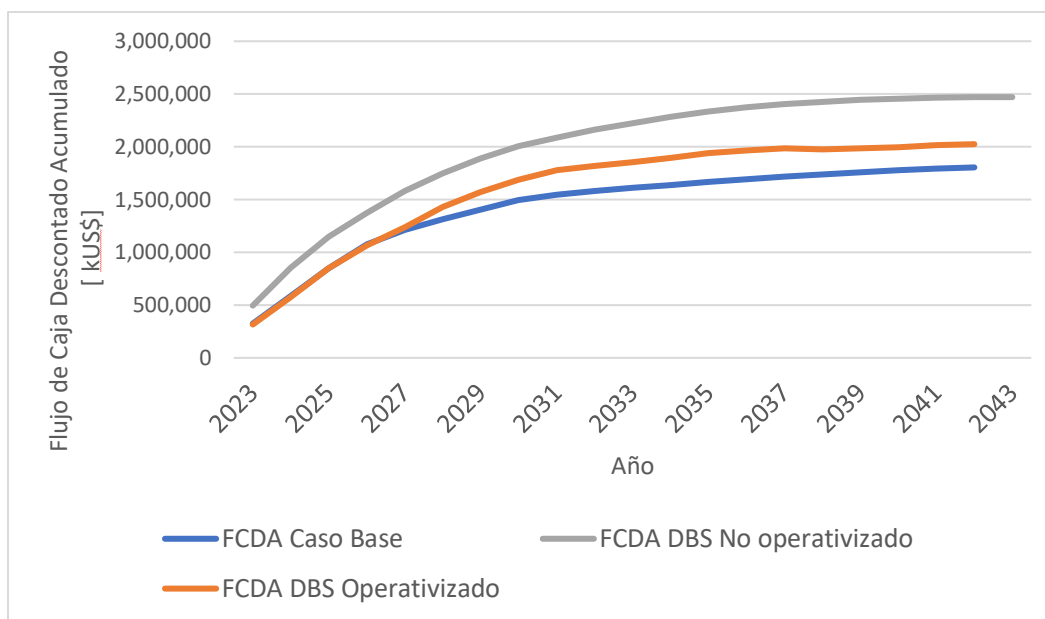


Figura 27: Gráfico FCDA Caso de Estudio 1

Como se observa en la Figura 27, en términos del flujo de caja descontado acumulado (FCDA), el plan generado por la herramienta MPSO, utilizando fases diseñadas en este estudio permitió alcanzar un FCDA de 2,025MUS\$. Esto significa 220MUS\$ (+12%) por sobre el caso base (CB), y 445MUS\$ bajo el plan computacional desarrollado por la herramienta DBS.

Es importante señalar que a pesar de alcanzar 220MUS\$ adicionales, existe un espacio que podría ser mejorado al inicio del plan ya que las curvas FCDA del CB y MPSO están sobrepuestas debido principalmente a que en los primeros años:

- La Fase 4 es la misma del CB y no se adapta al software SimSched DBS indica como más conveniente hacer, que es extenderse hacia el sur-este del rajo.
- Fase 5 y 6 nuevas tienen posiciones similares a las fases 5 y 6 del CB, aunque se estilizan un poco, captando parte de las indicaciones de SS DBS.
- El plan prepara la mina para las nuevas fases, posteriores a la F06, lo que permite capturar un mayor valor económico, a partir del año 2024.

Lo importante a destacar sobre este espacio de mejora podría ser capturado al indagar la posibilidad de evitar el uso de fases en los primeros periodos, usando directamente polvorazos que sean guiados por los resultados que brinda el software SS DBS; la idea es

intentar capturar el valor del primer quinquenio, que no pudo tomarse usando fases, para lo cual hay que congelar un periodo corto del programa del CB y así respetar compromisos de producción de corto plazo.

En cuanto al análisis económico del Caso de Estudio 2, se estudió el FCD, el cual se muestra en la Figura 28, donde se muestra que al igual que en el Caso de Estudio 1, existe un aumento durante los primeros años y existe un peak durante los años 2028-2032, lo que se atribuye a la incorporación del rajo semi-independiente.

Al comparar el Flujo de Caja Descontado Acumulado (FCDA) se aprecia que, desde los primeros periodos del plan, la secuencia DBS entrega mayores resultados que el Caso Base logrando cerca de US\$1,000M a fin del año 2025.

El resultado del plan operativo alcanza un FCDA de US\$6,040M, versus los US\$5,152M del Caso Base, mostrado en la Figura 29. Lo que se traduce en una ganancia de US\$890M, la cual es capturada mayoritariamente en los primeros años del plan.

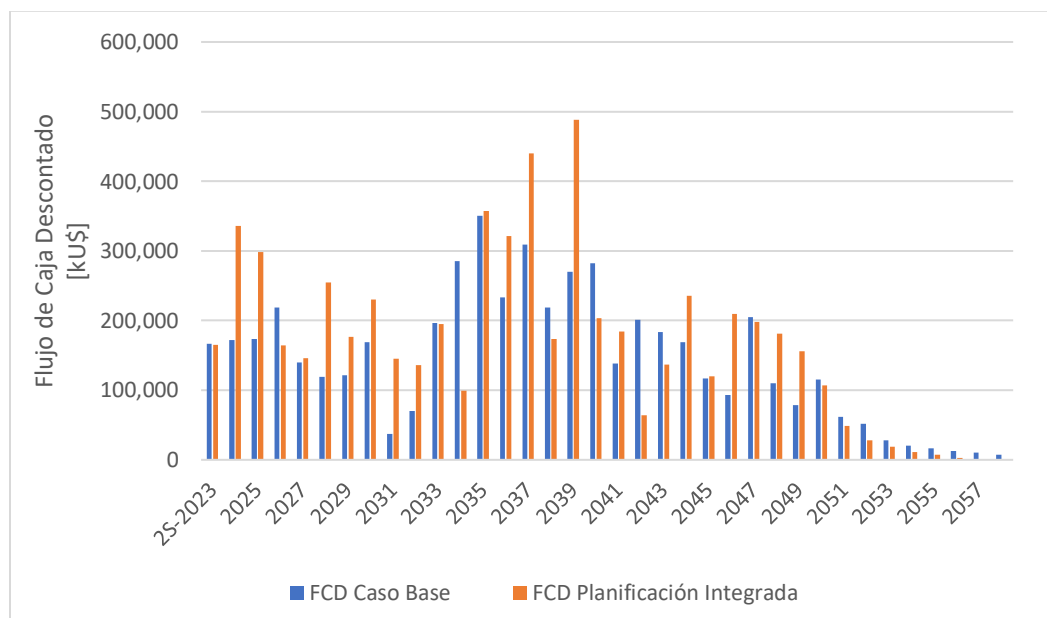


Figura 28: Gráfico FCD Caso de Estudio 2

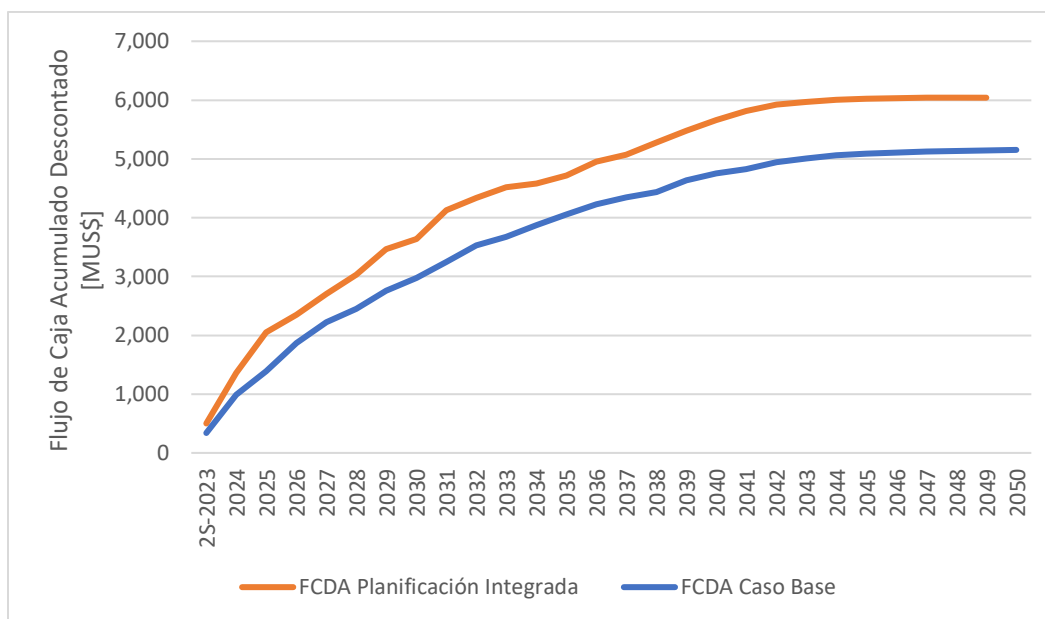


Figura 29: Gráfico FCDA Caso de Estudio 2

Finalmente, es importante discutir que como se mencionó en el Caso de Estudio 1, existe un espacio de valor que se pierde al inicio del plan. Lo cual no ocurre al utilizar la metodología de planificación integrada y como se muestra en la Figura 29: Gráfico FCDA Caso de Estudio 2 existe un aumento en el FCDA desde el inicio del plan, llegando a casi un 18% más de valor.

7. Conclusión

El objetivo principal de este estudio corresponde a comparar las ventajas de utilizar la tecnología DBS por sobre la metodología tradicional en términos de la selectividad para los distintos horizontes de la planificación.

En el caso de la metodología tradicional, el proceso de diseño de fases presenta ciertas deficiencias. Pese a que se basa en un razonamiento matemático se requiere intervención del planificador para obtener un buen resultado, lo cual puede llegar a no ser el resultado óptimo.

Por otra parte, en la metodología DBS son menos las etapas del proceso donde se requiere la toma de decisiones por parte del diseñador, y aunque estas no se eliminan, se obtienen fases con distinto valor de proyecto al plan minero.

Como se observa en el Caso de Estudio 1, se observa que el DBS modifica los diseños existentes, optimizando la secuencia de fases de extracción. También se muestra que al utilizar la metodología DBS se obtiene un mayor beneficio económico, superando al caso base en un 12%, el cual se ve disminuido una vez definidas las fases y posterior a la optimización de estas. Lo cual también se ve afectado debido a que las primeras fases no son consideradas en la optimización debido a que ya se encuentran operativas, lo que provoca que los valores sean similares en los primeros años.

Teniendo esto en consideración, para el Caso de Estudio 2, se implementó la planificación integrada, la cual considera periodos de tiempo distintos y busca develar el valor económico que no pudo ser obtenido en el caso anterior. En este caso, la agrupación de periodos trajo un aumento en el FCDA del 19% lo cual se debe a la capacidad que presenta la metodología DBS para optimizar la secuencia cuando se consideran periodos de tiempo diferentes.

Además, es importante destacar la importancia de la planificación integrada, que considera diferentes horizontes temporales en conjunto con la metodología DBS para capturar un mayor valor económico desde el inicio del plan. Como ocurrió en el Caso de Estudio 1, que

una vez que se operativiza en DBS se pierde una considerable ganancia durante el primer quinquenio. Mientras que la planificación integrada logra capturar este valor desde los inicios del plan.

Finalmente, es importante destacar que el uso de nuevas tecnologías como el DBS deben seguir siendo estudiadas para poder capturar todo el valor que estas pueden brindar a la industria minera.

8. Referencias

Lane, K. (1964). *The Economic Definition of Ore: Cut-off Grades in Theory And Practice*.

Lerchs H, Grossmann I. F. (1965) “*Optimum design of open pit mines*”, Joint CORS and ORSA Conference.

Johnson, T. (1968). *Optimum Open Pit Mine Production Scheduling*. Berkeley: University of California.

Savage, S. (2000). *The Flaw of Averages*. The San Jose Mercury News.

Vargas, M. (2011). *Modelo de planificación minera de corto y mediano plazo incorporando restricciones operacionales y de mezcla*. Tesis para optar al grado de Magíster en Minería.

Meagher, C., Dimitrakopoulos, R., & AVIS, D. (2014). *Optimized Open Pit Mine Design, Pushback and the Gap Problem- A Review*. Journal of Mining Science, 508-526.

Morales, N., Jélvez, E., Nance-Penard, P., Marinho, A., & Guimaraes, O. (2015). *A comparison of conventional and Direct Block Scheduling method for open pit mine production scheduling*. In APCOM, Fairbanks, Alaska, EEUU.

Morales, N., Jélvez, E., Nance-Penard, P., Peypouquetd, J., Reyes, P. (2016). *Aggregation heuristic for the open-pit block scheduling problem*. European Journal of Operational Research.

Camus, J. (2017). *Mine sequence optimization at Codelco's open pit mines*. Geomin MinePlanning.

Miranda, F (2017). *Alineamiento de la Selección del Pit Final con la Optimización del Secuenciamiento Estratégico*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas

Ribeiro, F., Rodrigues, H., Saleimen, A., Arroyo, C., Soares, L., & Carvalho, L. (2018). *Direct block scheduling technology: Analysis of Avidity*. REM – International Engineering Journal, 71(1), 97-104

Nelis, G. (2021). *Metodología de agendamiento de la producción considerando la creación de polígonos y restricciones geometalúrgicas*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería de Minas.

Camus, J. (2023). *Planning Open Pit Using Direct Block Scheduling Technology*, Geomin-Mineplanning (2023).