

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Incremento del valor económico a través del secuenciamiento
global del planeamiento minero a largo plazo**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Anthony Bryan Neyra Rodríguez

 [0009-0000-0336-3198](https://orcid.org/0009-0000-0336-3198)

Asesor

MBA. Víctor Manuel Hernández Díaz

 [0000-0002-6505-0733](https://orcid.org/0000-0002-6505-0733)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Neyra Rodríguez [1]
Referencia/Reference	[1] A. Neyra Rodríguez, <i>“Incremento del valor económico a través del secuenciamiento global del planeamiento minero a largo plazo”</i> [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Neyra, 2024)
Referencia/Reference	Neyra, A. (2024). <i>Incremento del valor económico a través del secuenciamiento global del planeamiento minero a largo plazo</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Con mucho amor y cariño para mi madre Sonia, mis abuelos y mi hermano Jean Carlos, quienes siempre están presentes en cada etapa de mi vida personal y profesional.

Agradecimientos

A mi alma máter la Universidad Nacional de Ingeniería y los docentes, por ser los pioneros en la mi etapa de formación como bachiller en ingeniería de minas.

A mi asesor Víctor Hernández y especialista Enrique Paredes Rivero por su tiempo y valioso aporte a la presente tesis.

A mis amigos y colegas que conocí en el desarrollo del trabajo de suficiencia profesional.

Resumen

El presente estudio, titulado "Incremento del valor económico a través del secuenciamiento global del planeamiento minero a largo plazo", aborda uno de los desafíos más significativos para los planificadores de minas a cielo abierto: determinar la secuencia óptima de explotación de los recursos minerales de un yacimiento con el fin de maximizar el valor económico del proyecto minero.

Considerando que la metodología tradicional más comúnmente aceptada en la industria minera presenta varias deficiencias en su algoritmo. Esto se debe a que cada etapa individual del proceso de planificación a largo plazo, desde la valorización del modelo de bloques hasta la elaboración del plan de producción, se optimiza de forma parcial y dependiente.

Según la hipótesis planteada el secuenciamiento global de un proyecto a tajo abierto, está relacionada con un mayor valor económico, al compararlo con un secuenciamiento parcial y dependiente.

El objetivo principal de este trabajo es medir el impacto económico de la implementación del secuenciamiento global, utilizando la lógica de Direct Block Scheduling desarrollada por la empresa Mining Math.

Es importante resaltar que este estudio se realiza en el contexto de un proyecto minero de cobre a cielo abierto en el sur de Perú. Aquí, la información presentada se verá influenciada por un factor que afectará de manera uniforme a todas las variables, garantizando la consistencia de los resultados. Por lo tanto, los descubrimientos y conclusiones alcanzados no reflejan necesariamente la realidad, sino que constituyen más bien un análisis teórico dentro de este contexto particular.

Para llevar a cabo este estudio, se recopilaron datos de diversas áreas que integran el proyecto minero, incluyendo:

Mantenimiento (disponibilidades %).

Mina (productividad, velocidades, utilización y criterios operativos).

Planta (procesamiento de mineral, recuperaciones %).

Finanzas (precios \$/t, costos \$/t, contrato de venta).

Geología (Leyes, densidad, dimensiones del bloque, mineralización).

Geotécnica (estabilidad del tajo).

La motivación del presente estudio es beneficiar a las empresas y colaboradores a través del incremento de valor de un proyecto minero al implementar el secuenciamiento global de todas las etapas unitarias de planificación minera. Este enfoque, al aumentar el flujo de caja en los primeros años mediante el procesamiento de las leyes más altas, ayuda a las empresas a recuperar la inversión de capital en menos tiempo e incrementar su valor en el mercado mundial. Además, los colaboradores y sus familias se benefician al percibir mejores compensaciones salariales, lo que mejora su calidad de vida a través de oportunidades educativas, de salud y de prosperidad. El Estado peruano también se verá favorecido mediante el aumento de los impuestos, lo que permitirá mejorar la infraestructura educativa, la atención en centros de salud y la provisión de servicios en comedores populares, entre otros beneficios. Además, se presentará la oportunidad de reevaluar proyectos mineros que actualmente carecen de atractivo para la inversión.

Palabras clave — Secuenciamiento global, incremento de valor, agendamiento directo de bloques, fases mineras.

Abstract

This research project, titled "Increasing Economic Value through Global Sequencing of Long-term Mining Planning," addresses one of the most significant challenges for open pit mine planners: determining the optimal sequence for exploiting mineral resources in a deposit to maximize the economic value of the mining project.

Considering that the most accepted traditional methodology in the mining industry presents several deficiencies in its algorithm, it is noteworthy that each individual stage of the long-term planning process, from block model valuation to production plan development, is optimized partially and dependently.

According to the hypothesis proposed, the global sequencing of an open-pit project is associated with greater economic value when compared to partial and dependent sequencing.

The main objective of this work is to measure the economic impact of implementing global sequencing, using the Direct Block Scheduling logic developed by Mining Math.

It is important to emphasize that this study is conducted within the context of an open-pit copper mining project in southern Peru. Here, the presented information will be influenced by a factor that uniformly affects all variables, ensuring the consistency of results. Therefore, the findings and conclusions reached do not necessarily reflect reality but rather constitute a theoretical analysis within this context.

For the development of this study, data was collected from all different areas that are part of the mining project, such as:

Maintenance (physical availability%)

Mine (productivities, velocity, utilization, and operational standard)

Plant (processing mineral, recoveries %)

Finance (prices \$/y, costs \$/t, sales contract)

Geology (grades, density, block dimensions, mineralization)

Geotechnical (pit stability)

The motivation behind this study is to benefit both companies and employees by increasing the value of a mining project through the consideration of global sequencing of all unitary stages of mining planning. This approach, by boosting cash flow in the early years through the processing of higher-grade ores, enables companies to recoup their capital investment in less time and increase their value in the global market. Additionally, employees and their families benefit from improved salary compensation, thereby enhancing their quality of life through educational, health, and prosperity opportunities. The Peruvian state will also benefit from increased taxes, enabling the enhancement of educational infrastructure, healthcare services, and the provision of services in popular dining facilities, among other benefits. Furthermore, this will present the opportunity to reassess mining projects that currently lack attractiveness for investment.

Keywords — Global sequencing, value increment, direct block scheduling, mining phases.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.3 Objetivo del estudio.....	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Hipótesis del estudio	6
1.4.1 Hipótesis general	6
1.4.2 Hipótesis específica	6
1.5 Antecedentes de la investigación	6
1.5.1 Antecedentes Internacionales	6
1.5.2 Antecedentes Nacionales.....	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	11
2.1 Marco teórico	11
2.1.1 Planeamiento largo plazo.....	11
2.1.2 Planificación tradicional.....	11
2.1.3 Agendamiento directo de bloques (DBS).....	12
2.1.4 Geomecánica.....	14
2.2 Marco conceptual.....	15
2.2.1 Fases	15
2.2.2 Blending	15
2.2.3 Ramp-up	16
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	17

3.1	Modelo de bloques.....	17
3.2	Parámetros técnicos económicos.....	19
3.3	Sectores geotécnicos	21
3.4	Definición de escenarios	22
3.5	Caso Base	22
3.5.1	Envolvente económica	22
3.5.2	Diseño y Reservas de las fases estratégicas	25
3.5.3	Plan de producción.....	27
3.5.4	Evaluación económica	29
3.6	Caso DBS	34
3.6.1	Envolvente económica y secuencia de fases	34
3.6.2	Plan de producción.....	36
3.6.3	Evaluación económica	38
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	43
4.1	Producción Mina	43
4.2	Alimentación a la planta	44
4.3	Perfil de Producción de Cobre.....	45
4.4	Valor económico	47
	Conclusiones	49
	Recomendaciones	51
	Referencias bibliográficas.....	52
	Anexos	53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Parámetros del modelo de bloques.....	17
Tabla 2: Variables del modelo de bloques	18
Tabla 3: Precio de los metales.....	19
Tabla 4: Costo de mina.....	19
Tabla 5: Costo de procesamiento por tipo de mineral	20
Tabla 6: Ley pagable por metal.....	20
Tabla 7: Costo de venta por metal	20
Tabla 8: Parámetros geotécnicos.....	21
Tabla 9: Cubicación de Reservas – Caso Base	26
Tabla 10: Flujo caja del Caso Base - 2024 al 2033	31
Tabla 11: Flujo caja del Caso Base - 2034 al 2043	32
Tabla 12: Flujo caja del Caso Base - 2034 al 2043	33
Tabla 13: Cubicación de Reservas – Caso DBS	35
Tabla 14: Flujo caja del Caso DBs - 2024 al 2033	40
Tabla 15: Flujo caja del Caso Base - 2034 al 2043	41
Tabla 16: Flujo caja del Caso Base - 2044 al 2053	42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Pasos de la optimización en minería tradicional.....	2
Figura 2: Envolvente final – Lerch & Grossmann	3
Figura 3: Secuencia de Fases	3
Figura 4: Plan de producción mina.....	4
Figura 5: Metodología Lerch & Grossmann para la envolvente final	12
Figura 6: Flujo de optimización DBS	13
Figura 7: Pasos de la optimización DBS	13
Figura 8: Componentes geotécnicos de un diseño minero a tajo abierto	15
Figura 9: Sectores geotécnicos.....	21
Figura 10: Secuencia de Pits Shells.....	23
Figura 11: Método Worst Case	24
Figura 12: Método Best Case	24
Figura 13: VAN acumulativo pit por pit.....	24
Figura 14: Secuencia de fases – Caso Base	26
Figura 15: Valor económico por fase (USD \$/t ore) – Caso Base	27
Figura 16: Plan de producción – Caso Base	28
Figura 17: Alimentación a la planta de beneficio - Caso Base.....	29
Figura 18: Valor presente Neto - Caso Base.....	30
Figura 19: Secuencia de fases - Caso DBs.....	34
Figura 20: Valor económico por fase (USD \$/t ore) – Caso DBs.....	36
Figura 21: Plan de producción – Caso DBs	37
Figura 22: Alimentación a la planta de beneficio - Caso DBs.....	38
Figura 23: Valor presente Neto - Caso DBs	39
Figura 24: Movimiento Total Caso Base vs Caso DBS	43
Figura 25: Alimentación a la Planta – Caso Base vs Caso DBS	44
Figura 26: Producción de cobre – Caso Base vs Caso DBS.....	45

Figura 27: Flujo de caja descontado – Caso Base vs Caso DBS 47

Introducción

El presente estudio considera como objetivo evaluar el impacto en el valor económico de un proyecto minero al tener en cuenta la secuenciación global de los procesos individuales de la planificación a largo plazo.

El desarrollo del trabajo se divide en 4 capítulos de acuerdo con la filosofía de la escalera de conocimiento.

En el Capítulo I se aborda el problema principal de la investigación, el cual se fundamenta en fuentes de apoyo que se reflejan en la realidad. Se establece el objetivo principal del presente trabajo de investigación y se proporciona una descripción de los antecedentes más relevantes en la industria minera.

El Capítulo II presenta el marco teórico, detallando la metodología actual y los procesos unitarios del planeamiento a largo plazo. Estos procesos consideran la optimización del tajo final como punto de partida y concluyen con la elaboración del plan de producción del metal de interés económico.

En el Capítulo III se presentan los resultados de la investigación, los cuales se muestran a través de gráficos, tablas y tendencias. Estos resultados evidencian que, al considerar la secuencia global, se incrementa en un 2% el valor presente neto del proyecto de investigación durante los primeros 5 años, en comparación con el valor obtenido al utilizar un secuenciamiento parcial y dependiente.

Finalmente, en el Capítulo IV se exponen los resultados tras un análisis derivado del presente trabajo de investigación.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El presente estudio analiza el principal desafío al que se enfrentan los planificadores de minería a largo plazo: maximizar el valor presente neto de un proyecto minero mediante la secuencia de extracción, teniendo en cuenta los principales problemas operativos de la minería a cielo abierto.

Un enfoque de secuenciamiento parcial y dependiente de los procesos individuales de planificación no logra maximizar el objetivo global. Optimizar cada proceso de forma aislada solo maximiza el valor de ese proceso en particular, ya que no considera el impacto de una decisión temprana en el futuro del proyecto.

La investigación propone optimizar de manera conjunta todos los procesos unitarios, considerando el impacto de cada decisión en los procesos siguientes y cómo estas decisiones pueden generar oportunidades en todos los procesos unitarios.

La secuencia global aumentará los ingresos en los primeros años de operación al incluir el procesamiento de los minerales de mayor ley y posponer los de menor o marginal ley. La principal medida de desempeño del trabajo de suficiencia es el Valor Actual Neto (VAN).

1.2 Descripción del problema de investigación

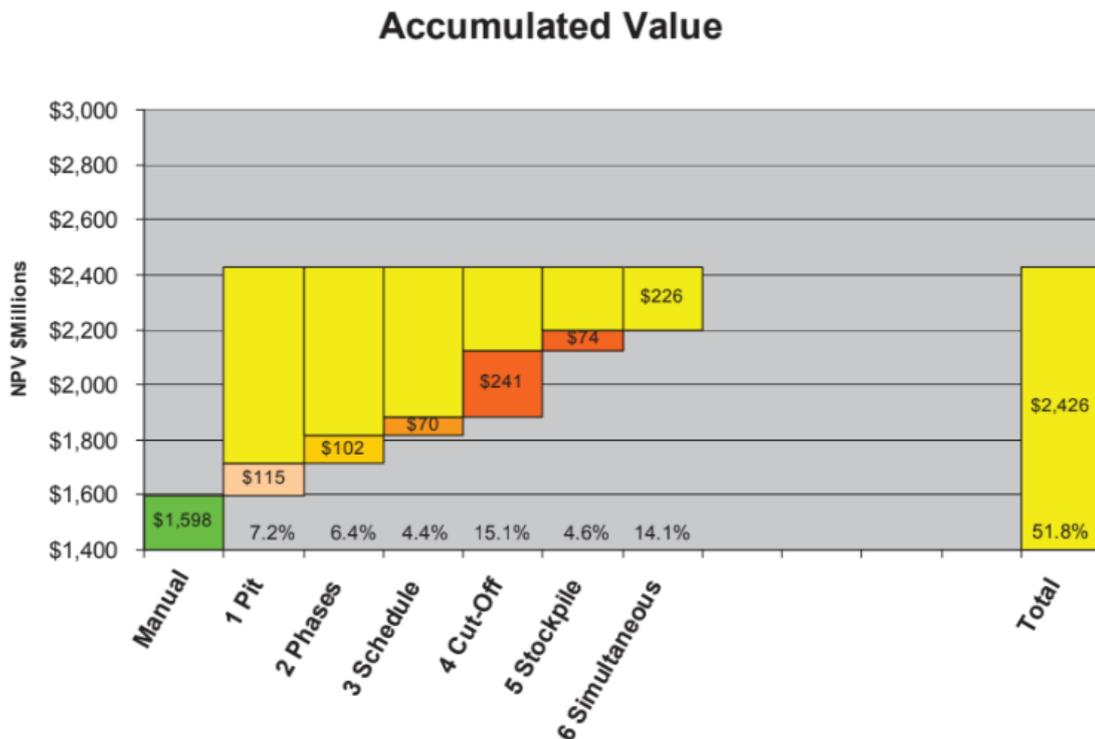
En cualquier proyecto minero a tajo abierto, el mayor desafío para los planificadores mineros radica en diseñar la secuencia de extracción de los recursos minerales de manera que maximice el valor económico del proyecto, y al mismo tiempo que se aborden los principales problemas operativos. Vale la pena destacar que la metodología tradicional para determinar la extracción de recursos mineros no considera el factor tiempo, el cual es fundamental en la evaluación financiera de un proyecto. Por lo tanto, dado que la metodología convencional no toma en cuenta la variable tiempo, puede no ser una guía óptima para la optimización. Esto es especialmente relevante ya que, dependiendo de las características específicas del yacimiento, los resultados obtenidos podrían alejarse aún

más del óptimo matemático deseado. Incorporar el factor tiempo en la planificación minera puede conducir a decisiones más acertadas y una mejor maximización del valor económico del proyecto

Actualmente, la metodología tradicional de planificación a largo plazo, ampliamente aceptada en la industria minera para maximizar el valor económico del proyecto, implica una serie de procesos unitarios que se optimizan de manera parcial y dependiente entre sí. En la Figura 1 resumen los procesos mencionados.

Figura 1

Pasos de la optimización en minería tradicional



Fuente: whittle G (2010) Enterprise Optimisation

La metodología tradicional parte de la optimización del tajo final, buscando encontrar el cono óptimo que maximice el valor económico del proyecto, en este proceso, se considera el algoritmo de Lerchs and Grossmann (LG) o cono flotante (FC), ver la Figura 2.

Figura 2

Envolvente final – Lerch & Grossmann

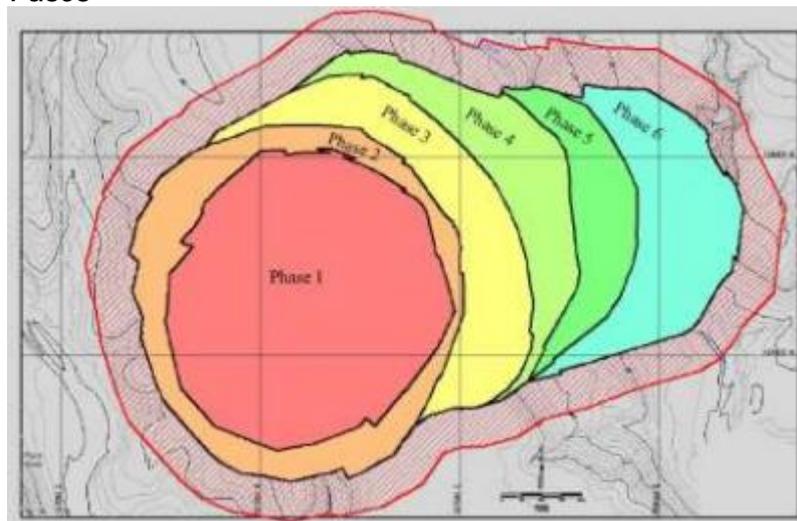
	Columns																		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
2	-8	-8	-8	-8	-8	8	24	24	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
3	-12		-12	-12	-12	4	32	36	20	8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12		
4				-16	-16	0	32	48	32	0	-16	-16	-16	-16	-16	-16			
5					-20	-4	28	56	44	12	-16	-20	-20	-20	-20				
6						-8	24	56	56	24	-8	-24	-24	-24					
7							20	52	64	36	4	-24	-28						
8								16	48	64	48	16	-16	-32					
9										60	56	28	-4	-32					

Fuente: Hustruuld W. (1995) Open pit mine Planning Design

El siguiente proceso unitario es el diseño de fases mineras, donde se tienen en cuenta los parámetros geotécnicos para garantizar la estabilidad del tajo abierto. En esta etapa se establece el orden de explotación del yacimiento, considerando el secuenciamiento sugerido por los conos anidados. Para esta etapa, se deben tener en cuenta los anchos mínimos de minado de los equipos principales del proyecto minero. Con esta información, se definirán las geometrías (ancho y largo) de cada fase de explotación. La Figura 3 muestra las fases de explotación mineras del proyecto minero a tajo abierto Las Cruces.

Figura 3

Secuencia de Fases



Fuente: Javier L. (2018) diseño económico óptimo para la extracción a cielo abierto de una masa mineral fuera del proyecto "las cruces".

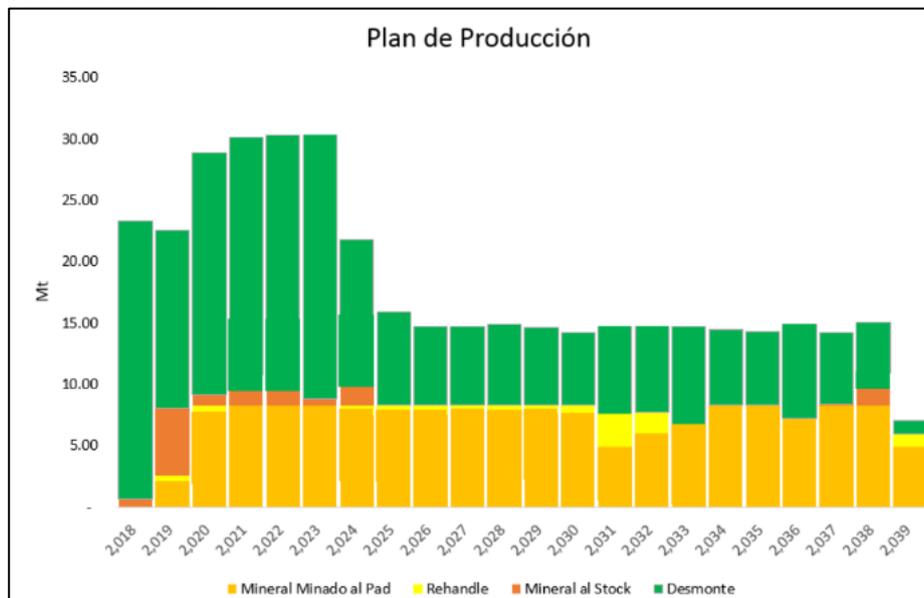
El siguiente proceso unitario, después del diseño de fases, es el plan de producción de mina. En este proceso se define el inicio de la explotación por fase, el ritmo de producción, la cantidad de equipos y el destino de los materiales para cada fase minera. Además, se consideran criterios operativos como el máximo avance vertical, la interacción entre fases mineras y rampas principales.

El plan de producción de mina resume la cantidad de material a remover, producción de cobre, política de ley de corte, cantidad de material de remanejo, distribución de equipos de carguío, horas requeridas de equipos de carguío, cantidad y calidad de concentrado a vender, grados de los materiales contaminantes y reservas totales del proyecto.

La Figura 4 muestra el plan de producción de un proyecto minero, incluyendo el mineral extraído, desmonte minado y mineral enviado a la planta de beneficio con origen del stock pile (remanejo).

Figura 4

Plan de producción mina



Fuente: Christian Q. (2019) Optimización en el planeamiento a largo plazo, con la programación directa de bloques frente a la metodología de planeamiento tradicional.

La metodología tradicional, además de no considerar la variable tiempo, se basa en la optimización de procesos unitarios de forma separada y secuencial. Esto significa que cada etapa se optimiza sin tener en cuenta el impacto global en el valor económico

del proyecto. Por lo tanto, los planificadores de mina que utilizan esta metodología suelen cuestionarse constantemente si están empleando la estrategia que realmente maximiza el valor del proyecto. Esta falta de integración y consideración del panorama completo puede generar incertidumbre y dudas sobre la efectividad de la metodología tradicional en la maximización del valor económico de la operación minera.

Por tanto, es crucial contar con una metodología global que integre la variable tiempo, optimice todos los procesos unitarios de planificación de manera conjunta y aborde las restricciones operativas. Esta aproximación holística permitiría una toma de decisiones más informada y una planificación más efectiva en la industria minera.

En la actualidad, la empresa Mining Math cuenta con el módulo “Direct Block Scheduling”, que utiliza un enfoque de programación entera mixta y heurística para encontrar la solución óptima global de la extracción de un yacimiento minero a cielo abierto, maximizando así el valor del proyecto

La formulación del problema de la presente investigación es: ¿En qué medida el secuenciamiento global de explotación de una mina a tajo abierto incide en el valor económico del proyecto minero?

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo General

Implementar el secuenciamiento global en la planificación minera a largo plazo en una mina a cielo abierto para aumentar considerablemente el valor económico del proyecto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Incrementar la rentabilidad del proyecto en 2% o más en los primeros 5 años de operación.
- Implementar un nuevo direccionamiento de valor en la secuencia de fases mineras.

1.4 Hipótesis del estudio

1.4.1 Hipótesis general

Se logrará incrementar el valor económico de un proyecto minero cuando se implemente el secuenciamiento global del planeamiento minero a largo plazo a una mina a cielo abierto.

- **Variable independiente**

La implementación del secuenciamiento global del planeamiento minero a largo plazo.

- **Variable dependiente**

Incremento de valor económico.

1.4.2 Hipótesis específica

- Se incrementará el valor económico en 2% o más en los 5 primeros años de operación cuando se implementación el secuenciamiento global.
- Se implementará un nuevo direccionamiento de valor en las fases mineras.

1.5 Antecedentes de la investigación

1.5.1 Antecedentes Internacionales

Castillo Ormazábal, E. (2019). En su tesis titulada “APLICACIÓN DEL AGENDAMIENTO DE BLOQUES COMO GUÍA PARA SELECCIÓN DE FASES”.

El autor plantea como objetivo general cuantificar el incremento de valor económico asociado en la selección y diseño de las fases mineras, a través del método de agendamiento de bloques, en comparación a la metodología aceptada en la industria minera.

La aplicación de agendamiento de bloques (DBS) para un proyecto minero incorpora variables económicas y descuentos en el tiempo desde el modelo de bloques entregando una optimización global representado por una envolvente económica y secuencia de extracción óptima en términos de valor económica.

El autor concluye que “se obtienen mejoras del 4.6 % comparativamente a nivel de VAN para el plan guiado desde DBS”.

Javier Llorente, C. (2018). En su tesis titulada “DISEÑO ECONÓMICO PARA LA EXTRACCIÓN A CIELO ABIERTO DE UNA MASA DE MINERAL FUERA DEL PROYECTO MINERO LAS CRUCES”.

El autor plantea como objetivo general diseñar una fase de minado de expansión bajo la optimización del algoritmo Whittle para un proyecto minero a tajo abierto de cobre, además analizar los beneficios económicos, a través de la producción de cobre adicional, reducción de costos de extracción, a su vez minimizar el capex de sostenimiento.

El autor toma como punto de partida la optimización del algoritmo Lerchs & Grossman, el cual, si se sigue una expansión del proyecto actual a través de una guía de diseño, una vez entendido en su totalidad se realizó un diseño de extracción operativa y a su vez genere la máxima recuperación de extracción de mineral dentro de la guía de diseño.

El autor concluye que, a pesar de la cantidad de desmonte a remover para la extracción del mineral del proyecto de extracción, la calidad de ley de cobre es lo suficientemente alta pagando y generando un beneficio económico atractivo para la empresa minera.

Isabella Cerchiaro, S. (2017). En artículo de investigación “APLICACIÓN DEL SOFTWARE DOPPLER EN UN PROYECTO MINERO HIPOTÉTICO DE UN YACIMIENTO POLIMETÁLICO”.

El artículo de investigación tiene como objetivo “Obtener la valoración económica y el agendamiento para un proyecto minero hipotético de oro a cielo abierto mediante el uso de DOPPLER como herramienta informática”. Esta herramienta de software tiene en cuenta diversos parámetros mineros, como la capacidad de los destinos, los precios de los metales, los costos de extracción, los ángulos de talud, entre otras variables. El valor presente neto se establece como el punto principal de comparación, el cual será analizado y comparado entre ambos casos de estudio.

El autor concluye que “El VPN obtenido por los algoritmos de agendamiento directo de bloques y agendamiento por bloques son considerablemente mayores con respecto a

los obtenidos en Best Case y Worst Case “. El valor presente neto obtenido utilizando la metodología del software DOPPLER es de 29.8 millones de dólares, lo que supera el valor de 25.3 millones de dólares obtenido con la metodología By pit and Bench.

1.5.2 Antecedentes Nacionales

Niño Céspedes, C. (2017). En su tesis titulada “MAXIMIZACIÓN DE VALOR A TRAVÉS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE FASES Y PLAN DE PRODUCCIÓN DE UNA MINA A TAJO ABIERTO”.

El autor plantea como objetivo “sustentar los procedimientos necesarios para maximizar el valor de un proyecto minero a tajo abierto a través de la elaboración de un óptimo diseño de fases y plan de producción operativo, empleando una tendencia de planificación minera innovadora denominada programación directa de bloques”, el cual, partirá desde el impacto en el diseño de fases y elaboración del plan de producción de cobre, abasteciendo las necesidades operativas de una mina atajo abierto.

El autor describe la programación directa de bloques (DBS) como un enfoque innovador que ofrece una integración completa, eliminando la necesidad de seguir los procesos o pasos de la planificación minera tradicional. La tesis resume los resultados obtenidos al aplicar la metodología tradicional y la programación directa de bloques en un yacimiento minero, explotado por tajo abierto.

El autor concluye que “La optimización de tajo final empleando el algoritmo DBS brinda una mejor orientación de valor para el diseño de fases, lo que permitió maximizar el VPN del proyecto a pesar de la disminución de valor producto de las restricciones operativas”.

Quispe, C. (2019). En su tesis titulada “OPTIMIZACIÓN EN EL PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO, CON LA PROGRAMACIÓN DIRECTA DE BLOQUES FRENTE A LA METODOLOGÍA DE PLANEAMIENTO TRADICIONAL”.

El autor de la tesis tiene como objetivo principal “Determinar un caso de negocio, comparando dos metodologías diferentes; una metodología tradicional frente a una metodología que aplica una optimización con direccionamiento de bloques”.

El autor plantea dos casos de estudios, partiendo con el caso BASE el cual aplicará la metodología tradicional a través de los resultados obtenido del algoritmo Learch & Grossmann y el segundo caso de estudio caso UCSM el cual aplicará la metodología de programación directa de bloques a través de los resultados obtenidos en el software Simsched.

El autor concluye que, al considerar esta metodología innovadora desde el análisis de la optimización minera hasta el resultado económico de un proyecto minero, se logra un incremento de 3.2% en el valor presente neto del proyecto, en comparación con la metodología tradicional cuyo proceso de planificación minera, empieza desde la optimización del tajo final, secuenciamiento de las fases minera, plan de producción, política de mezclas, política de ley de corte y evaluaciones financieras.

Cortez, C. (2022). En su trabajo de suficiencia titulada “DETERMINACIÓN DE LA SECUENCIA DE MINADO Y REMANEJO DE STOCKS PARA EL TRATAMIENTO DE ÓXIDOS Y DE SULFUROS EN UNA MINA DE COBRE A TAJO ABIERTO”.

El autor del trabajo de suficiencia tiene como objetivo “Formular una alternativa de secuencia de minado y remanejo de stocks que cumpla con el throughput, restricciones de los contaminantes y el margen unitario máximo de la planta de sulfuros y la planta de óxidos en la etapa de ramp up”.

Basándose en la información recopilada de áreas clave como la planta de óxidos, la planta de sulfuros, mantenimiento, geología, planeamiento, operaciones mineras y condiciones de seguridad, el autor desarrolla diversas alternativas de minería para satisfacer las necesidades de las plantas de beneficio.

El autor introduce estos datos en el software Mineplan, específicamente en el módulo Planner Project. Este software propone tonelajes y leyes de alimentación según el tipo de material presente en el yacimiento, teniendo en cuenta el rendimiento de las plantas de beneficio. El resultado final cumple con el objetivo de maximizar el margen unitario de la empresa y reducir los costos de transporte y carga.

El autor concluye que la “En el caso de la planta de sulfuros, se obtuvo una ley promedio de cobre total (CUT) de 1.73%, mientras que para el caso de la planta de óxidos se una ley promedio de cobre soluble en ácido (CUAS) de 0.68%, mientras que el margen unitario obtenido fue el mayor de las tres alternativas presentadas, con un valor promedio de 86.59 \$/t para el envío a planta de sulfuros y de 31.37 \$/t en el caso del envío a la planta de óxidos”.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Planeamiento largo plazo*

Calder, P. (Tópicos de Ingeniería en minas a rajo abierto, 2000).

El libro publicado por Calder P., menciona la importancia del planeamiento a largo plazo, empezando desde la envolvente económica de un yacimiento minero, secuencia y diseño de explotación, capacidad de minado, capacidades de infraestructuras operativas, capacidad de planta, producción de los metales de interés, ley de corte, estimación de cantidad de equipos requeridos y estimación financiera.

La planificación a largo plazo dependiendo del horizonte a evaluar se divide en Proyecto desarrollo de Recursos (RDP), Plan de negocio (LOM) y Presupuesto anual (Budget).

- RDP: Se desarrolla distintas alternativas de negocios desde el presente año hasta el agotamiento de los recursos, cada alternativa genera un incremento de valor en el proyecto minero y mayor operatividad en la ejecución, esta etapa marca el alineamiento del proceso LOM.
- Plan de negocios: Se desarrolla el plan de producción del proyecto minero, en base a la guía estratégica de mayor valor del proceso RDP.
- Budget: Se desarrolla el plan minero de los primeros 5 años de la vida de la mina, considerando como guía de producción el Plan de negocios. En este punto se pueden realizar cambio y/o mejoras para incrementar los ingresos de la compañía.

2.1.2 *Planificación tradicional*

Hustrulid, W.; (1995) Open pit mine Planning & Design.

El libro publicado por Hustrulid menciona la metodología de "Lerchs and Grossmann" como el algoritmo matemático utilizado para calcular la envolvente final que maximiza el valor económico del proyecto y las reservas de mineral para un proyecto minero.

Este algoritmo, basado en la programación lineal, utiliza una sección transversal 2D de un modelo de bloques como base, considerando restricciones de ángulo global y diversos parámetros económicos como el precio del metal, el costo de extracción, las recuperaciones metalúrgicas, los impuestos de explotación y los límites de propiedad. Además, tiene en cuenta la topografía inicial del proyecto a evaluar, la representación del yacimiento minero a través del modelo de bloques y la estimación de las leyes de los metales y las litologías.

La Figura 5 muestra los resultados del algoritmo, el cual, encuentra la envolvente final de un yacimiento minero que maximiza el valor económico y reservas de mineral, considerando los parámetros económicos, geotécnicos y operativos mencionados líneas atrás.

Figura 5

Metodología Lerch & Grossmann para la envolvente final

	Columns																		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
2	-8	-8	-8	-8	-8	8	24	24	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
3	-12	-12	-12	-12	4	32	36	20	8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
4				-16	-16	0	32	48	32	0	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
5					-20	-4	28	56	44	12	16	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
6						-8	24	56	56	24	-8	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
7							20	52	64	36	4	-24	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28
8								16	48	64	48	16	-16	-32	-32	-32	-32	-32	-32
9										60	56	28	-4	32	32	32	32	32	32

Fuente: Hustruuld W. (1995) Open pit mine Planning Design

2.1.3 Agendamiento directo de bloques (DBS)

Jélves, E (2000) Agendamiento directo de bloques en minería a cielo abierto.

El desarrollo del curso del PhD Jélves Enrique, introduce la metodología de agendamiento de bloques para la estimación de la secuencia de minado para un yacimiento minero en busca del mayor beneficio económico. En el curso de menciona la base matemática fue sustentada por Johnson en 1968, considerando los puntos restrictivos:

- Ángulo del talud global
- Descuento en el tiempo

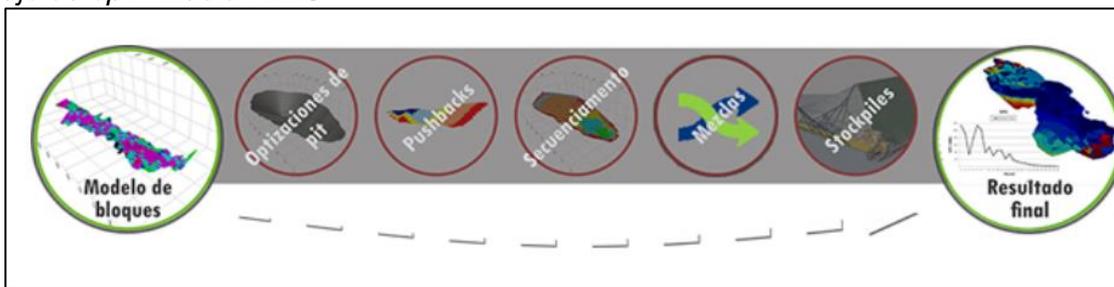
- Capacidades de mina y planta
- Variables económicas

La programación directa de bloques propone énfasis en la temporalidad de extracción de cada bloque, considerando como base el costo de oportunidad; Además, busca optimizar el periodo de extracción y destino de cada bloque de minado.

Como resultado final, esta metodología basada en la programación entera mixta y heurística, prioriza el minado de los bloques con mayor ingreso económico en los primeros años de la mina, aumentando el flujo económico de estos periodos, procesando el mineral con mejores leyes en los primeros años del proyecto y postergando el mineral de mejor ley en los periodos finales.

Figura 6

Flujo de optimización DBS



Fuente: Mining Math. (2017) www.miningmath.com

Figura 7

Pasos de la optimización DBS



Fuente: Elaboración propia

La metodología tradicional implica una serie de subprocesos que agregan valor en cada etapa, lo que resulta en un VAN de 2,426 MUSD\$. En contraste, la metodología DBS propone un aumento adicional de valor al optimizar todos los procesos en uno solo, considerando la oportunidad de tomar una decisión temprana en cada proceso. La Figura 8 muestra el incremento de valor que se podría generar al considerar lo mencionado, 53% más del valor con respecto al proceso manual y 1% más con respecto al proceso tradicional.

La finalidad del DBS es buscar maximizar el valor presente neto de todo proyecto minero a tajo abierto, decidiendo qué bloques serán minados, el periodo de minado y destino final. Para esta decisión el DBS optimiza todos los procesos del planeamiento a largo plazo en conjunto, partiendo desde el modelo de bloques, optimización del pit, diseño y secuencia de fases de minado, plan de mezclas y stock pile, entregando como resultados finales un plan de minado que cumple con todas las restricciones operativas de un proyecto minero a tajo abierto y además con mayor valor económico.

2.1.4 Geomecánica

Andrés, P (2015) Planificación minera a cielo abierto utilizando fundamentos geomecánicas.

El diseño de fases en un proyecto minero a cielo abierto debe tener en cuenta, además del valor económico y la operatividad de la extracción, criterios de estabilidad del talud, siendo el factor de seguridad (FS) el criterio más aceptado.

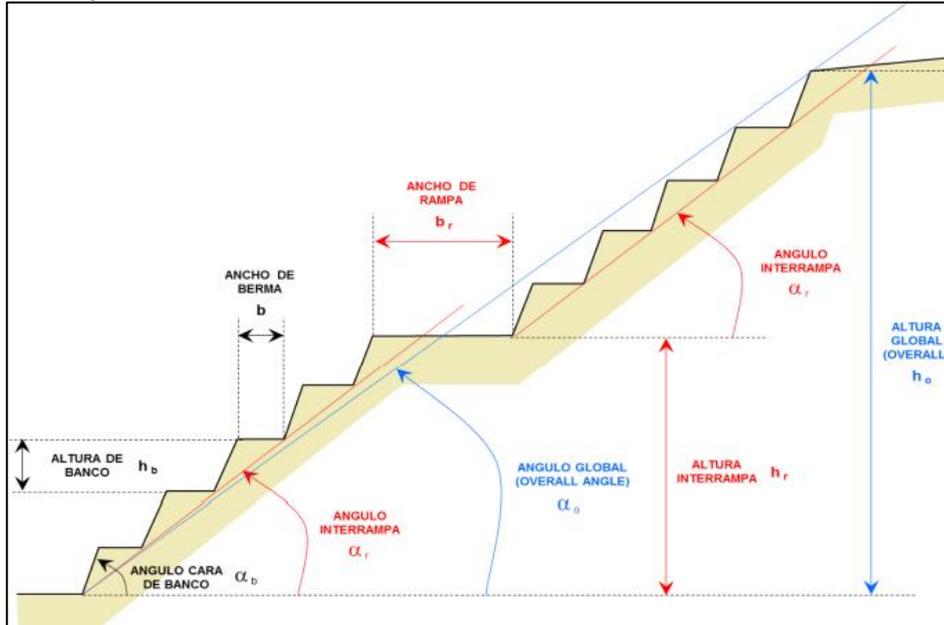
Los componentes geométricos de un talud minero son:

- Ángulo de cara de banco: se define como el ángulo que se forma al intersecar el plano horizontal y la pared de banco.
- Altura de banco: es la diferencia de niveles entre bancos consecutivos, esta altura es consecuencia de la geología y tamaño de los equipos de producción.
- Ancho de berma: es la distancia entre la cresta y pie del banco.
- Ángulo global de talud: es el ángulo que se forma al unir la zona más profunda del tajo abierto y la zona más alta del diseño.

- Ángulo inter-rampa: es el ángulo que forma la cresta de un banco y el pie del siguiente banco, se debe considerar el ancho de rampa.
- Ancho de rampa: es el ancho de plataforma donde circularán los camiones mineros.

Figura 8

Componentes geotécnicos de un diseño minero a tajo abierto



Fuente: Andrés, P (2015), Planificación minera a cielo abierto utilizando fundamentos geomecánicas.

Los criterios descritos en este capítulo son fundamentales para verificar la estabilidad de un diseño minero a cielo abierto. Los ingenieros de diseño deben considerar la estabilidad de todos los taludes generados durante la extracción antes de buscar únicamente la rentabilidad o el ingreso económico a través del diseño minero.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Fases

La función del diseño de fases es proponer las etapas de explotación de un yacimiento minero, teniendo en cuenta el valor económico, factores de seguridad mecánica y geomecánica, geometrías operacionales y límites de propiedad.

2.2.2 Blending

El blending consiste en la mezcla de los distintos tipos de mineral presentes en un yacimiento minero. Cada material posee diferentes propiedades químicas, por lo que es

necesario combinarlos para obtener un producto uniforme que pueda ser enviado a la planta de beneficio.

2.2.3 Ramp-up

Incremento de capacidad o producción de forma escalonada a través del tiempo.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Modelo de bloques

Las dimensiones del modelo de bloques es 20x20x15 metros, lo que incluye un total de 5,372,730 bloques que representan toda la extensión del depósito minero; en la Tabla 1 muestra las coordenadas de origen y cantidad de bloques correspondiente.

Tabla 1

Parámetros del modelo de bloques

Coordenada	Min	Max	Dxyz	#Bloques
x	72,610	76,610	20	201
y	477,910	483,290	20	270
z	402.5	1,872.5	15	99

Fuente: Elaboración propia

Cada bloque contiene información crucial sobre la mineralización que es necesaria para el desarrollo del trabajo de investigación. Entre estos datos se incluyen las leyes del metal a extraer, las densidades (g/cm³), las recuperaciones metalúrgicas (%), la caracterización geotécnica, los costos de procesamiento y de extracción minera, así como la incertidumbre asociada con cada bloque (medido, indicado e inferido), la litología, entre otros. En la Tabla 2 muestra las variables del modelo.

Tabla 2*Variables del modelo de bloques*

Variable del Modelo Bloques	Rango		Precisión	Unidad	Descripción
	Min.	Max.			
AGLP	0	10	0.0001	gr	Ley de Plata
AULP	0	420	0.001	pbm	Ley de Oro
CATLP	0	4	1	-	Categoría
CUTLP	0	10	0.001	%	Ley de Cobre
DENLP	1.5336	4	0.001	g/cm3	Densidad
MOLP	0	2700	0.01	ppm	Ley de molibdeno
ORELP	0	9	1	-	Tipo de mineral
RECCU	0	93	0.001	%	Recuperación de cobre
RECMO	0	69	0.001	%	Recuperación de molibdeno
RECAU	0	66	0.001	%	Recuperación de Oro
RECAG	0	75	0.001	%	Recuperación de Palta
%TOPO	0	101	0.01	%	Porcentaje de Roca
PTOPO	0	10	1	%	Bloque de aire (0) o roca (1)
GEOT	0	20	1	-	Geotécnia
DESAP	0	100	0.001	-	Densidad Aparente
OSA	0	100	0.01	-	Ángulo Global
F1	0	100	1	-	Fase 1
F2	0	100	1	-	Fase 2
F3	0	100	1	-	Fase 3
P1	0	100	0.001	%	Porcentaje 1
P2	0	100	0.001	%	Porcentaje 2
P3	0	100	0.001	%	Porcentaje 3
REVC	-9999	9999	0.01	-	Valor del concentrado (\$/ton)
MCAF	0	9999	0	-	Factor de incremento del costo de acarreo
MCO	0	999	0.001	-	Costo Base Ore + MCAF
MCW	0	999	0.001	-	Costo Base Waste + MCAF
RTYPE	1	10	1	-	Código roca para Whittle

Fuente: Elaboración propia

3.2 Parámetros técnicos económicos

Los parámetros económicos del proceso de valorización del modelo de bloques incluyen el precio del metal, los costos de extracción y procesamiento, el costo de venta, la ley pagable, entre otros. Las siguientes tablas resumen lo mencionado anteriormente.

Tabla 3

Precio de los metales

Metal	Unidad	Valor
Cu	\$/lb	3.24
Mo	\$/lb	9.49
Au	\$/oz	1,346
Ag	\$/oz	16.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Costo de mina

Costo Mina	Estéril	Mineral
Perforación	0.12	0.12
Voladura	0.16	0.16
Carguío	0.10	0.10
Costo variable Mina (Acarreo) (\$/t)	0.38	0.38
Costo fijo Mina	0.39	0.39
Total, Costo Mina (Acarreo) (\$/t)	0.77	0.77
Ref. Banco	1715	1715
Costo Base (\$/t)	0.45	0.45
Incr. (+) (\$/t)	0.02	0.02
Incr. (-) (\$/t)	0.04	0.04
Costo Mina Base	1.22	1.22
Costo de Sostenimiento Mina	0.25	0.25
Costo Mina Total (base) (\$/t)	1.47	1.47

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5*Costo de procesamiento por tipo de mineral*

Tipo Mineral	Variable	Fijo	S. Capital	Total
M1	4.2	5.3	2.5	12
M2	4.2	5.3	3	12
M3	4.2	5.3	3	12
M4	4.2	5.3	3	12
M5	4.2	5.3	3	12
M6	4.2	5.3	3	12
M7	4.2	5.3	3	12
M8	4.2	5.3	3	12
M9	4.2	5.3	3	12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6*Ley pagable por metal*

Ley pagable		
Metal	Unidad	Valor
Cu	%	96.30
Mo	%	96.58
Au	%	90.00
Ag	%	90.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7*Costo de venta por metal*

Costos de Venta		
Metal	Unidad	Valor
Cu	\$/lb	0.45
Mo	\$/lb	1.84
Au	\$/oz	-
Ag	\$/oz	-

Fuente: Elaboración propia

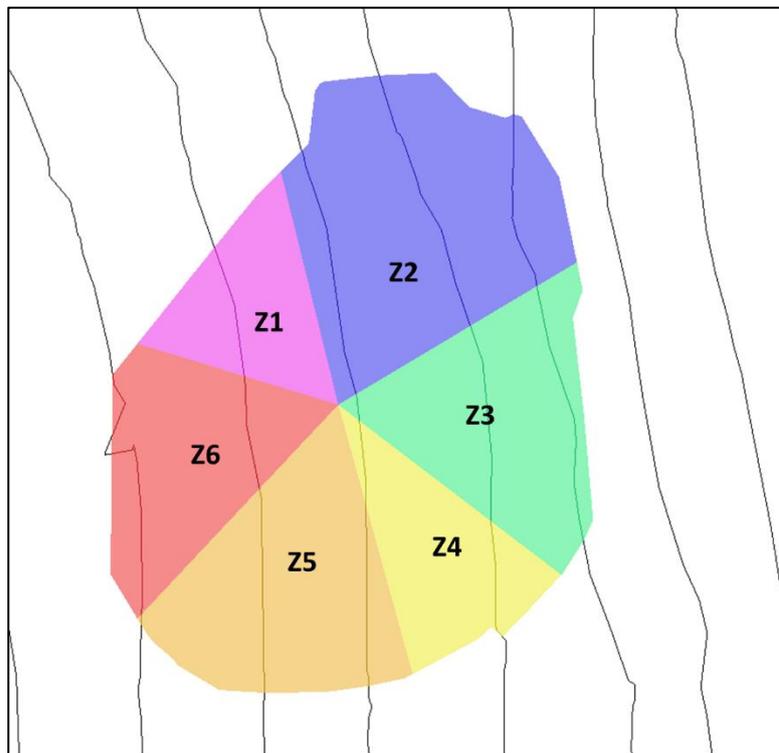
3.3 Sectores geotécnicos

El depósito se encuentra en una formación rocosa competente y medianamente competente, lo cual resulta beneficioso para el yacimiento, ya que permite extraer la mayor cantidad de mineral posible con un menor desbroce de desmonte.

El depósito se divide en 6 sectores geotécnicos (ver Figura 9), cada uno con parámetros geotécnicos específicos que contribuyen con la estabilidad de las paredes, como se detalla en la Tabla 8.

Figura 9

Sectores geotécnicos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Parámetros geotécnicos

Zona	Altura(mt)	BFA (°)	Ancho Berma (mt)	IRA (°)	#Rampas	Ángulo global (°)
1	30	70	18	46.1	6	42
2	30	70	20	44.1	6	40.8
3	30	65	16	45	6	40.7
4	15	67	8	46.2	6	39.8
5	15	65	7	47	6	40.2
6	30	70	20	44.1	6	40.8

Fuente: Elaboración propia

3.4 Definición de escenarios

Para este trabajo de suficiencia, se propuso el desarrollo de dos escenarios estratégicos y operativos. Ambos escenarios buscarán maximizar el valor presente neto del yacimiento, que se logrará mediante la optimización del Pit final, el diseño de fases mineras, el plan de producción de cobre y los resultados financieros.

El primer escenario propuesto se denominó "caso base". Este escenario se desarrolló utilizando la metodología tradicional de Lerchs & Grossman. Se obtuvieron los conos anidados y luego se seleccionó la envolvente económica, el diseño de fases y el plan de producción. Por otro lado, el escenario denominado "caso DBS" se desarrolló utilizando la metodología de programación directa de bloques. Esta metodología se basa en la programación entera mixta y heurística para encontrar la envolvente económica, unificando los procesos de optimización, diseño de fases y plan de producción.

3.5 Caso Base

3.5.1 Envolvente económica

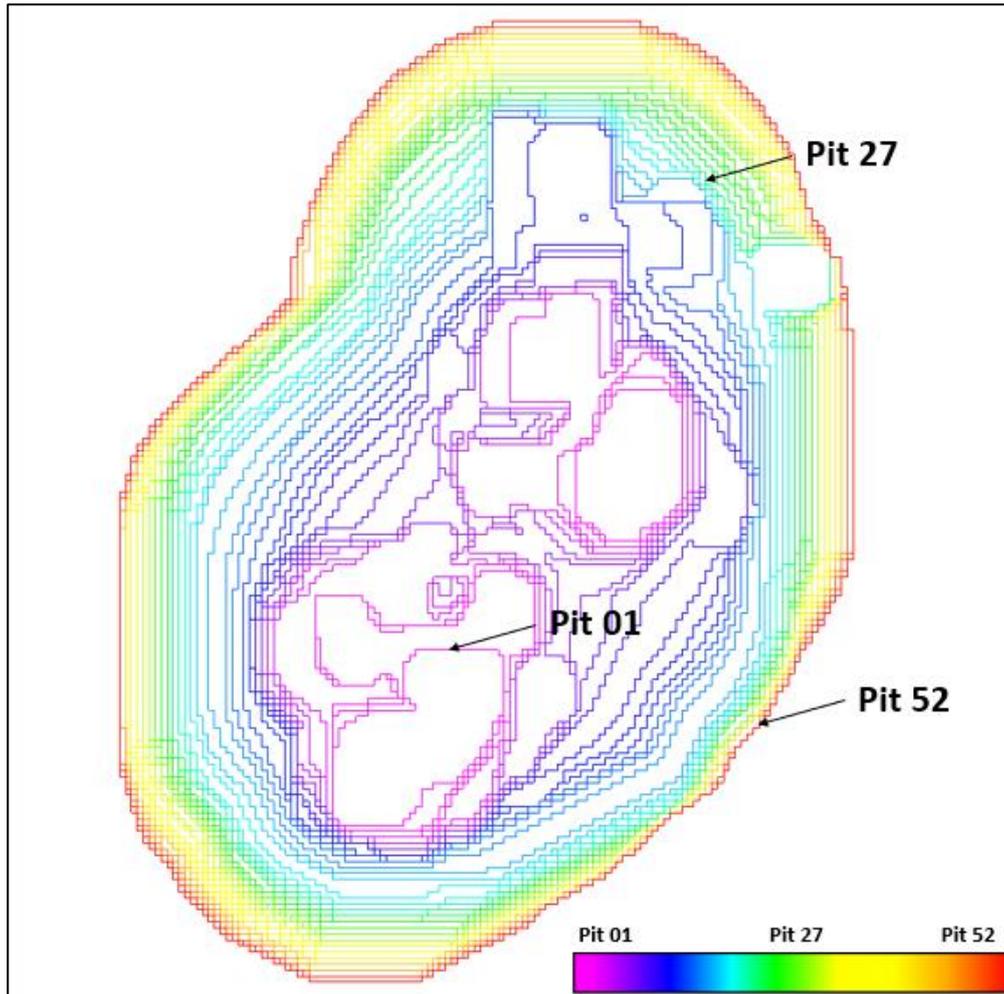
La metodología propuesta por Lerchs & Grossman genera una serie de envolventes anidadas concéntricas, conocidas como "pits Shells". Estas envolventes se obtienen al variar el precio del cobre.

El análisis de los pits shells proporciona la orientación para las fases mineras. En general, las zonas con mayor valor económico del yacimiento mantienen su rentabilidad incluso ante un precio poco atractivo para la compañía. Por lo tanto, el enfoque del ingeniero de planificación de minas a cielo abierto es priorizar el minado de dichos sectores y postergar las zonas con mayor riesgo de rentabilidad ante una variación de precio.

La Figura 10 muestra el secuenciamiento de los pits shells, los cuales son producto de sensibilizar el precio del cobre de 0.9 a 4.16 \$/lb en saltos de 0.06\$/lb, resultando 52 pit shells.

Figura 10

Secuencia de Pits Shells



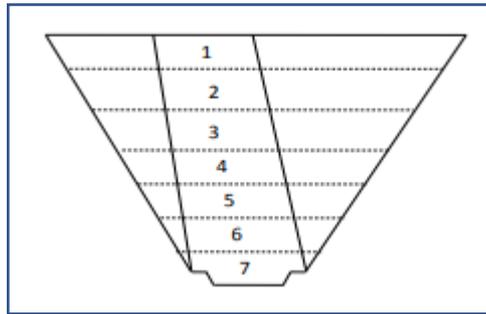
Fuente: Elaboración propia

La elección de la envolvente final dependerá de la postura de cada empresa; sin embargo, para este trabajo de suficiencia se empleó la metodología del "Best and Worst Case". Esto implica la elaboración de dos planes de producción con estrategias diferentes.

El plan "Worst case" implica el minado banco a banco del material dentro de la envolvente económica, priorizando el banco con mayor elevación y luego procediendo al siguiente en secuencia hasta llegar al último banco de la envolvente económica (ver Figura 11), En contraste, el plan "Best case" prioriza la extracción pit por pit, comenzando con el Pit 01 y avanzando hasta completar el minado del Pit 52, ver Figura 12.

Figura 11

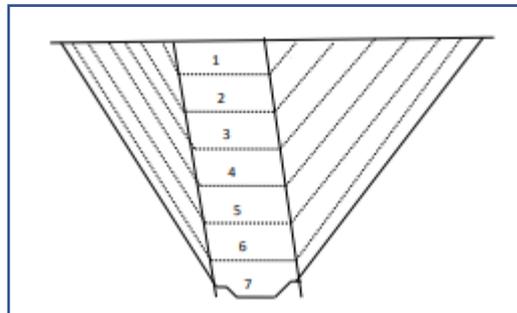
Método Worst Case



Fuente: Elaboración propia

Figura 12

Método Best Case

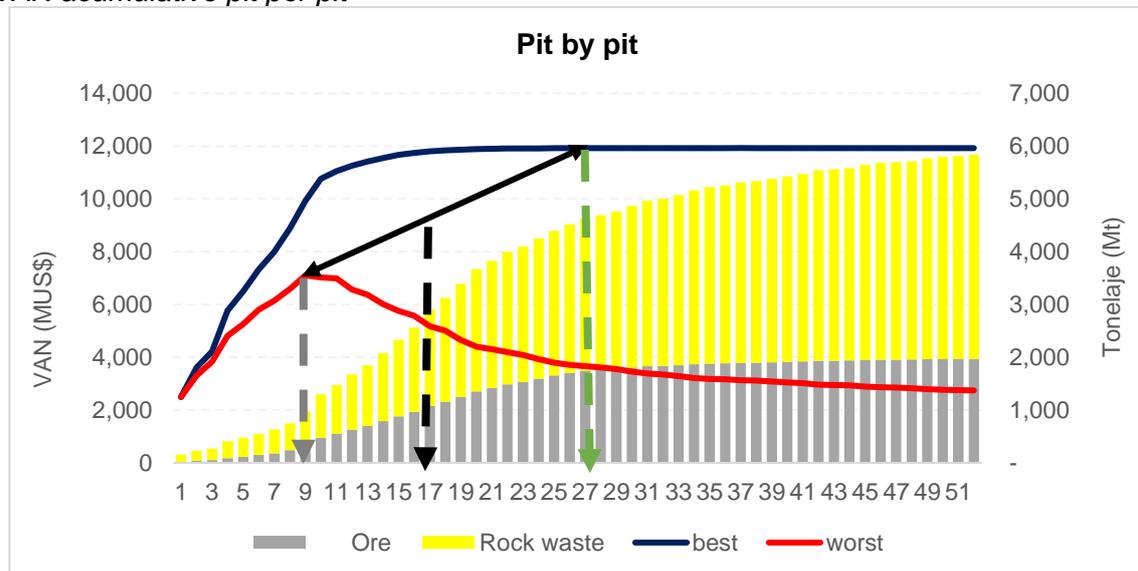


Fuente: Elaboración propia

La Figura 13 muestra la elección de la envolvente económica para el yacimiento de estudio, siendo el pit 17 la envolvente intermedia entre los casos de mayor rentabilidad para los planes Worst & Best case.

Figura 13

VAN acumulado pit por pit



Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Diseño y Reservas de las fases estratégicas

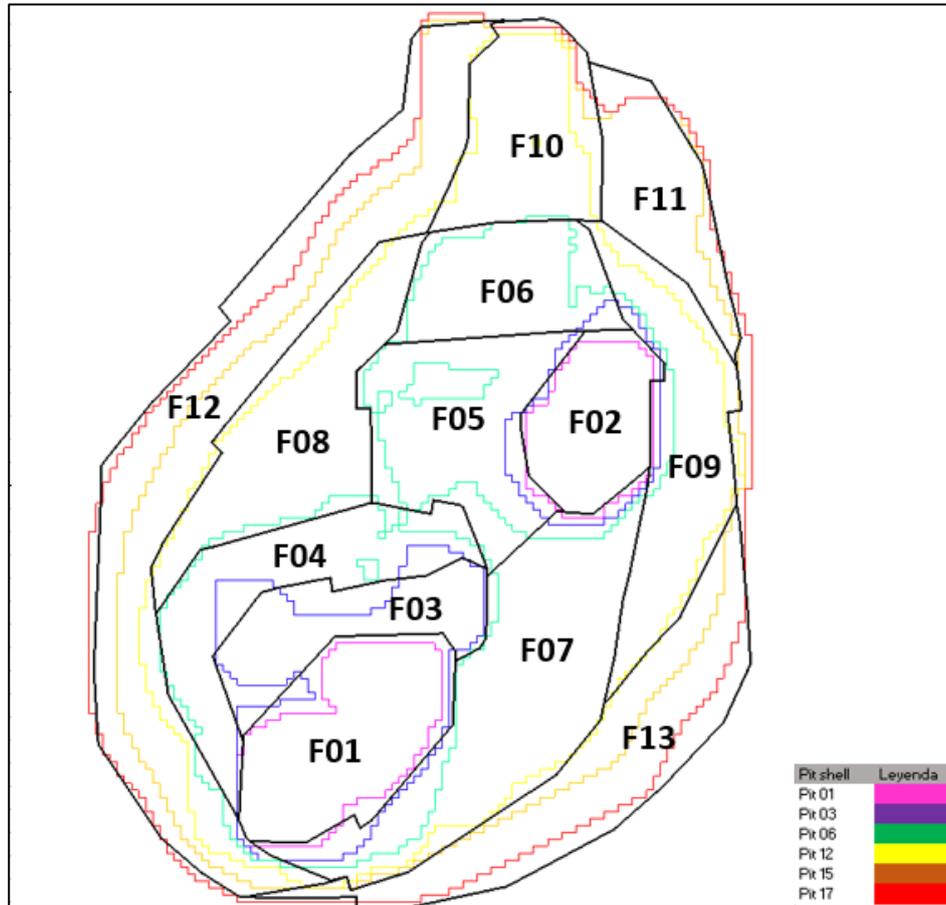
Los pits 01, 03, 06, 12, 15 y 17 fueron seleccionados como límites para el diseño de las fases mineras, teniendo en cuenta el valor presente neto, los anchos operativos y la proporción de desmonte a mineral.

La Figura 14 muestra la disposición secuencial de 13 fases mineras, las cuales abastecen criterios operativos como: rampas de 40 metros, anchos de minado mayores o iguales a 80 metros, parámetros geotécnicos y rampas en paralelo.

La cantidad de mineral extraído en el "caso base" se presenta en la Tabla, con un total de 1,202.6 Mtn y una ley media de 0.76% de Cu, junto con 2.15 gr/tn Ag y 37.5 ppb Au. Además, se estima que se removerán 1,826.4 Mtn de desmonte para la extracción total del mineral, lo que resulta en una relación promedio desmonte/mineral de 1.5 en el tajo final.

Figura 14

Secuencia de fases – Caso Base.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Cubicación de Reservas – Caso Base

Fase	Mineral				Desmonte Mton	USD\$/t ore	Stripping Ratio
	Mton	Cut (%)	Ag gr	Au ppb			
F01	25.9	1.77	2.04	50.11	75.8	101.1	2.9
F02	6.7	3.01	2.66	37.42	63.7	165.5	9.5
F03	32.8	1.03	2.16	66.50	47.0	62.7	1.4
F04	74.1	0.85	2.16	65.61	63.4	52.7	0.9
F05	58.1	0.88	2.53	34.58	72.4	50.6	1.2
F06	42.4	0.95	2.09	27.52	67.2	54.3	1.6
F07	175.6	0.72	1.94	39.42	190.2	41.8	1.1
F08	190.7	0.73	2.35	38.84	148.4	43.5	0.8
F09	126.7	0.78	2.44	28.00	155.5	44.3	1.2
F10	17.4	0.80	1.22	21.34	72.6	44.2	4.2
F11	59.8	0.58	1.86	23.24	90.8	33.1	1.5
F12	290.8	0.61	2.11	34.08	463.9	36.5	1.6
F13	101.3	0.67	1.96	37.79	315.6	38.4	3.1
Total	1,202.6	0.76	2.15	37.55	1,826.4	48.4	1.5

Fuente: Elaboración propia

Las fases 01 y 02 destacan por su alta rentabilidad económica, generando ingresos superiores a los 100 dólares por tonelada de mineral (\$/t ore). Les siguen las fases 03 a 06, con ingresos superiores a los 50 \$/t ore, mientras que las fases 07 a 10 muestran ingresos por encima de los 40 \$/t ore. Por último, las fases menos rentables (fases 11 a 13) ofrecen una rentabilidad inferior. La Figura 16 resume la variación de la rentabilidad.

Aunque la fase 02 es más rentable que la fase 01, se elige priorizar el minado de la fase 01 debido a la menor cantidad de desmonte que se debe retirar. Esto permite exponer el mineral más rápidamente, lo que beneficia la producción de cobre en los primeros años.

Figura 15

Valor económico por fase (USD \$/t ore) – Caso Base



Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Plan de producción

El plan de producción del “Case Base”, contempla el minado de 125 Mt de desmonte y 14 Mt de mineral en los primeros dos años de la operación (2023 y 2024), iniciando el funcionamiento de la planta de beneficio en el año 2026 con 25 Mt procesadas de mineral, 35 Mt de procesamiento en los años 2027 & 2028, 40 Mt en el año 2029. A partir del año 2030, se alcanzará la capacidad máxima de procesamiento de 45 Mt por año.

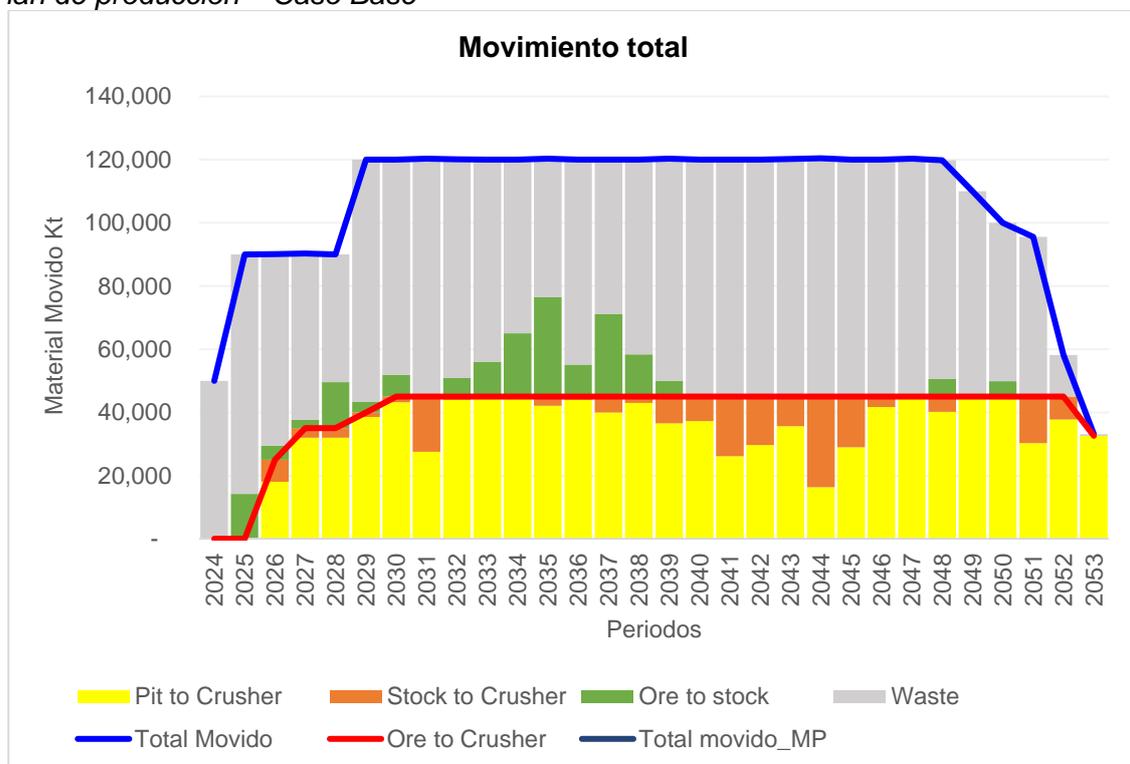
El movimiento promedio es de 120 Mt por año, que incluye el material minado y el remanejo de mineral destinado a la planta de beneficio. El plan de producción, a lo largo de la vida de la mina, se resume:

- Movimiento total (Minado + Remanejo): 3,209 Mt
- Minado total: 3,029 Mt
- Alimentación total: 1,202 Mt con 0.76 cut (%)
- Producción de cobre total: 8,214 ktcu
- Desmonte Total: 1,826 Mt

La Figura 16 ilustra el movimiento total de material a lo largo de la vida de la mina, comenzando con 50 Mt por año en 2024, aumentando a 90 Mt por año entre 2025 y 2028, y alcanzando la capacidad máxima de 120 Mt por año en 2029. El total de movimiento disminuye desde 2049 hasta 2053, reflejando el agotamiento de las reservas.

Figura 16

Plan de producción – Caso Base



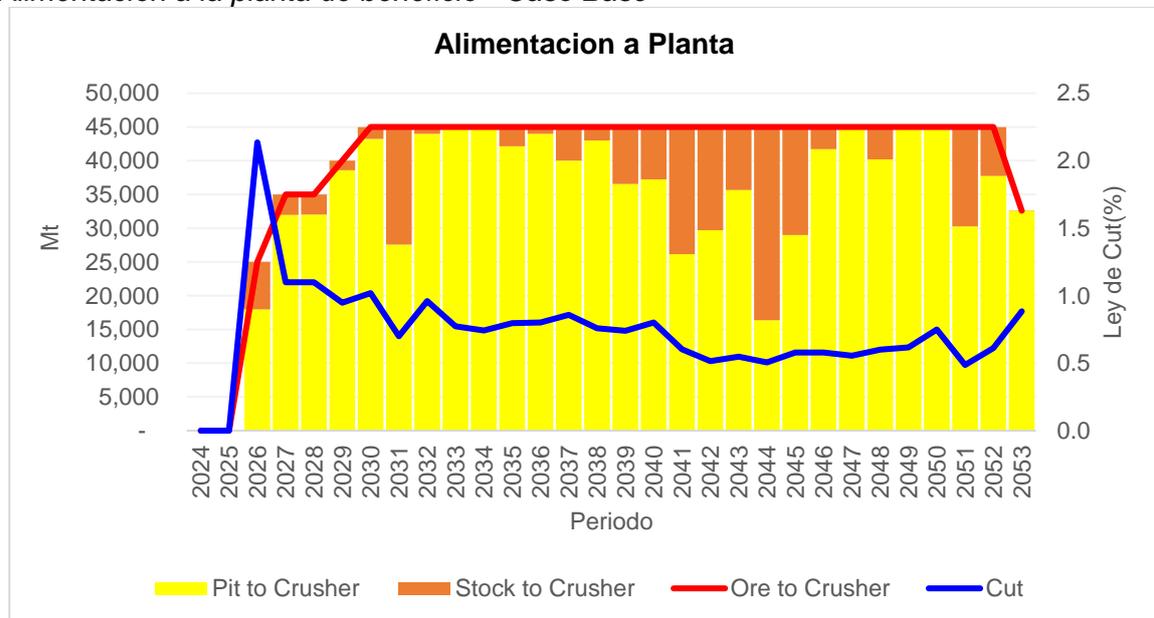
Fuente: Elaboración propia

La Figura 17 ilustra el aumento gradual en la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio. La producción de mineral de cobre comienza en el año 2026 con una capacidad de 25 Mt/año, que se incrementa a 35 Mt/año durante los años 2026 al 2027, alcanza los 40 Mt/año en 2028 y finalmente llega a 45 Mt/año desde el año 2029 hasta el final de la operación minera.

Por otro lado, se analiza cómo varía la ley de cobre (%) a lo largo de la vida útil de la mina. Comienza con leyes de cobre superiores al 2.0%, pero disminuyen hasta llegar a 0.5% en los últimos años.

Figura 17

Alimentación a la planta de beneficio - Caso Base



Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Evaluación económica

En la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 se presenta el flujo de caja derivado del plan de producción del "Caso Base". Se observa que la rentabilidad es más alta durante los primeros 5 años de producción (de 2026 a 2030), y luego disminuye debido a la menor producción de cobre. El ingreso total por la venta de cobre asciende a 32,808 millones de dólares estadounidenses (MUSD\$), lo que, aplicando una tasa del 10%, resulta en un valor presente neto de 12,218 MUSD\$ durante la vida útil de la mina

Por otro lado, la Figura 18 ilustra el comportamiento del VAN en periodos acumulativos de 5 y 10 años. Durante los primeros 5 años, el VAN es de 4,426 MUSD\$, y en los primeros 10 años alcanza los 8,350 MUSD\$. Desde la perspectiva de un inversor, el valor del proyecto en los primeros 5 años es crucial, especialmente en el contexto de la amortización de deudas de inversión.

Figura 18

Valor presente Neto - Caso Base

VAN (Caso Base)	MUSD\$
<u>VAN@LOM</u>	12,218
<u>VAN@5años</u>	4,426
<u>VAN@10años</u>	8,350

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10*Flujo caja del Caso Base - 2024 al 2033*

Destino	Unida	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033		
Ore to Crusher	kt	-	-	25,000	35,000	35,000	40,000	45,000	45,000	45,000	45,000		
Cut	%	-	-	2.14	1.10	1.10	0.95	1.02	0.70	0.96	0.77		
Mo	ppm	-	-	168	282	359	270	175	113	74	140		
Au	ppb	-	-	47	61	70	56	42	28	27	38		
Ag	ppm	-	-	2.3	2.1	2.2	2.3	2.6	1.8	1.7	2.0		
Costo Proc.	\$/ton	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00		
Costo Minado	\$/ton	1.54	1.59	1.67	1.70	1.77	1.71	1.72	1.72	1.80	1.88		
Costo Reh.	\$/ton	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56		
G&A	\$/ton	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00		
Revenue	\$/ton	-	-	120.5	66.1	66.7	57.0	58.9	40.6	53.3	44.4		
Pit to Crusher	kt	-	-	17,992	31,992	32,014	38,600	43,234	27,568	44,000	45,000		
Stock to Crusher	kt	-	-	7,008	3,008	2,986	1,400	1,766	17,432	1,000	-		
Ore to stock	kt	-	14,206	4,449	2,606	14,525	3,359	6,888	-	5,873	11,063		
Waste	kt	50,000	75,794	60,642	52,657	40,488	76,641	68,101	75,361	69,260	63,937		
Total, Minado	kt	50,000	90,000	83,083	87,255	87,027	118,600	118,223	102,929	119,132	120,000		
Total, Movido	kt	50,000	90,000	90,091	90,263	90,013	120,000	119,989	120,361	120,132	120,000		
Ingreso	M\$	-	-	3,012	2,312	2,336	2,282	2,653	1,826	2,397	2,000		
Costos	M\$	77	143	443	570	576	684	745	727	754	765		
Flujo Caja	M\$	-	77	-	143	2,569	1,741	1,759	1,598	1,908	1,099	1,642	1,235
Factor Desc		1.000	0.909	0.826	0.751	0.683	0.621	0.564	0.513	0.467	0.424		
Flujo Caja desc.	M\$	-	77	-	130	2,123	1,308	1,202	992	1,077	564	766	524

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11*Flujo caja del Caso Base - 2034 al 2043*

Destino	Unida	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
Ore to Crusher	kt	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000
Cut	%	0.74	0.80	0.80	0.86	0.76	0.74	0.80	0.60	0.52	0.55
Mo	ppm	216	363	278	158	184	176	135	88	87	108
Au	ppb	47	50	44	33	37	34	33	26	23	25
Ag	ppm	2.5	2.6	2.6	2.0	2.6	2.6	2.3	1.6	1.6	2.0
Costo Proc.	\$/ton	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Costo Minado	\$/ton	2.04	2.15	2.03	2.08	2.07	1.99	1.87	1.79	1.83	1.96
Costo Reh.	\$/ton	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
G&A	\$/ton	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Revenue	\$/ton	44.1	48.9	48.0	49.1	44.5	43.2	45.3	34.1	29.2	31.5
Pit to Crusher	kt	45,000	42,130	44,000	40,000	43,000	36,577	37,212	26,147	29,700	35,651
Stock to Crusher	kt	-	2,870	1,000	5,000	2,000	8,423	7,788	18,854	15,300	9,349
Ore to stock	kt	19,980	31,487	10,124	26,115	13,341	4,953	-	-	-	-
Waste	kt	55,020	43,804	64,904	48,885	61,659	70,376	74,988	74,957	75,000	75,208
Total, Minado	kt	120,000	117,421	119,028	115,000	118,000	111,906	112,200	101,104	104,700	110,859
Total, Movido	kt	120,000	120,291	120,028	120,000	120,000	120,329	119,988	119,957	120,000	120,208
Ingreso	M\$	1,983	2,200	2,162	2,210	2,001	1,946	2,040	1,534	1,314	1,417
Costos	M\$	784	794	783	782	786	768	754	731	740	763
Flujo Caja	M\$	1,199	1,406	1,379	1,428	1,215	1,178	1,287	803	574	655
Factor Desc		0.386	0.350	0.319	0.290	0.263	0.239	0.218	0.198	0.180	0.164
Flujo Caja desc.	M\$	462	493	440	414	320	282	280	159	103	107

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Flujo caja del Caso Base - 2034 al 2043

Destino	Unida	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053
Ore to Crusher	kt	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	32,602
Cut	%	0.51	0.58	0.58	0.56	0.60	0.62	0.75	0.49	0.61	0.88
Mo	ppm	108	160	195	248	280	285	232	121	160	221
Au	ppb	30	36	36	38	37	33	32	28	37	41
Ag	ppm	1.7	1.9	2.1	2.0	2.1	2.2	2.7	1.8	2.0	2.3
Costo Proc.	\$/ton	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Costo Minado	\$/ton	2.03	2.03	2.06	2.17	2.34	2.47	2.61	2.60	2.87	3.22
Costo Reh.	\$/ton	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
G&A	\$/ton	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Revenue	\$/ton	29.2	33.9	34.6	34.1	36.9	37.8	44.4	28.3	34.9	51.3
Pit to Crusher	kt	16,360	28,987	41,700	45,000	40,213	45,000	45,000	30,261	37,725	32,584
Stock to Crusher	kt	28,640	16,013	3,300	-	4,787	-	-	14,739	7,275	18
Ore to stock	kt	-	-	-	73	5,576	456	4,881	-	-	-
Waste	kt	75,440	75,013	75,000	75,256	69,211	64,544	50,119	50,509	13,161	511
Total, Minado	kt	91,800	104,000	116,700	120,329	115,000	110,000	100,000	80,770	50,887	33,096
Total, Movido	kt	120,440	120,013	120,000	120,329	119,787	110,000	100,000	95,509	58,161	33,114
Ingreso	M\$	1,316	1,527	1,556	1,535	1,661	1,700	1,997	1,272	1,571	1,674
Costos	M\$	743	761	782	801	812	811	801	758	690	498
Flujo Caja	M\$	573	766	774	733	849	889	1,196	513	881	1,176
Factor Desc		0.149	0.135	0.123	0.112	0.102	0.092	0.084	0.076	0.069	0.063
Flujo Caja desc.	M\$	85	104	95	82	86	82	100	39	61	74

Fuente: Elaboración propia

3.6 Caso DBS

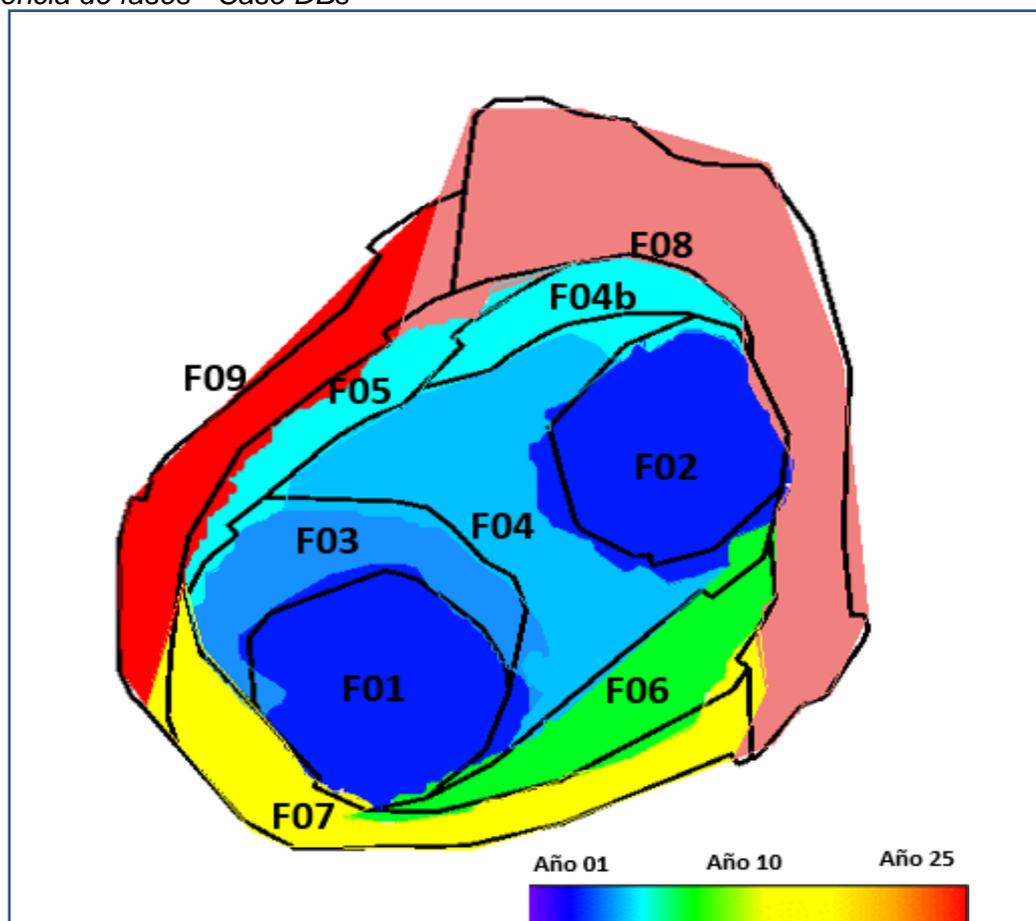
3.6.1 *Envoltura económica y secuencia de fases*

El propósito del "caso DBS" es maximizar el valor presente neto del proyecto mediante la optimización integral de los procesos: valoración de bloques, diseño de fases y plan de producción. Para determinar la geometría de minado final, se empleó el software Simesched, que integra en su lógica de decisiones la metodología del DBS.

La Figura 19 muestra la secuencia de minado sugerida por el software Simesched. Los tonos cálidos (azul-celeste) denotan el minado de los primeros años del proyecto, mientras que el minado de los años 10 al 20 se representa con tonos verde-amarillo. Los tonos rojo-rosado representan el minado de los últimos años del yacimiento. Además, se presenta el secuenciamiento de fases mineras en relación con la secuencia de minado proporcionada por Simesched.

Figura 19

Secuencia de fases - Caso DBs



Fuente: Elaboración propia

La cantidad de mineral extraído en el "caso DBS" se presenta en la Tabla 13, con un total de 1,202.6 Mtn y una ley media de 0.76% de Cu, junto con 2.16 gr/tn Ag y 37.4 ppb Au. Además, se estima que se removerán 1,826.4 Mtn de desmorte para la extracción total del mineral, lo que resulta en una relación promedio desmorte/mineral de 1.5 en el tajo final.

Tabla 13

Cubicación de Reservas – Caso DBS

Fase	Mineral				Desmorte	USD \$/t ore	Stripping Ratio
	Mton	Cut (%)	Ag gr	Au ppb	Mton		
F01	44.1	1.33	2.14	57.19	98.5	78.2	2.2
F02	39.5	1.54	2.40	30.76	116.1	86.0	2.9
F03	57.0	0.97	2.26	72.96	70.7	60.1	1.2
F04	317.6	0.77	2.23	38.28	270.4	45.1	0.9
F05	99.2	0.68	2.46	30.66	137.8	40.2	1.4
F06	92.4	0.76	1.91	42.91	147.0	43.7	1.6
F07	117.3	0.61	1.77	44.44	210.0	35.9	1.8
F08	218.6	0.68	2.12	25.59	462.5	38.5	2.1
F09	216.9	0.64	2.22	32.78	313.4	38.2	1.4
Total	1,202.6	0.76	2.16	37.40	1,826.4	48.7	1.5

Fuente: Elaboración propia

Las fases 01, 02 y 03 destacan por su alta rentabilidad económica, con ingresos superiores a los 60 USD \$/t ore. Les siguen las fases 04 a 06, con ingresos por encima de los 40 USD \$/t ore. Por último, las fases con menor rentabilidad son las fases 07 a 09, la Figura 20 ilustra la variación de la rentabilidad por fase.

Aunque la fase 02 muestra una mayor rentabilidad en comparación con la fase 01, se da prioridad al minado de la fase 01 debido a la menor cantidad de desmorte que se necesita remover. La fase 01 permite exponer el mineral con mayor rapidez, lo que beneficia la producción de cobre en los primeros años.

Figura 20

Valor económico por fase (USD \$/t ore) – Caso DBs



Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Plan de producción

El plan de producción del “Case DBS”, contempla el minado de 138.2 Mt de desmonte y 1.7 Mt de mineral en los primeros dos años de la operación (2023 y 2024), iniciando el funcionamiento de la planta de beneficio en el año 2026 con 25 Mt procesadas de mineral, 35 Mt de procesamiento en los años 2027 & 2028, 40 Mt en el año 2029. A partir del año 2030, se alcanzará la capacidad máxima de procesamiento de 45 Mt por año. El movimiento promedio es de 120 Mt por año, que incluye el material minado y el remanejo de mineral destinado a la planta de beneficio. El plan de producción, a lo largo de la vida de la mina, se resume:

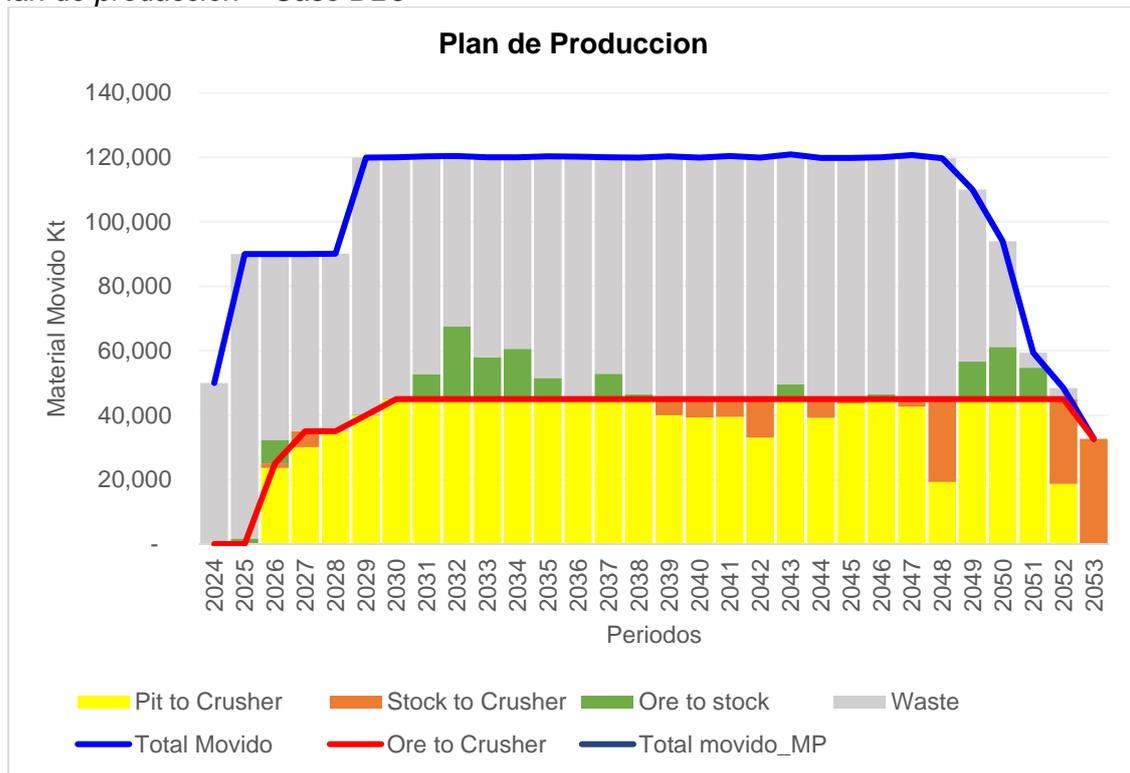
El plan de producción, a lo largo de la vida de la mina, contempla:

- Movimiento total (Minado + Remanejo): 3,136 Mt
- Minado total: 3,029 Mt
- Alimentación total: 1,202 Mt con 0.76 cut (%)
- Producción de cobre total: 8,214 ktcu
- Desmonte Total: 1,826 Mt

La Figura 21 ilustra el movimiento total de material a lo largo de la vida de la mina, comenzando con 50 Mt por año en 2024, aumentando a 90 Mt por año entre 2025 y 2028, y alcanzando la capacidad máxima de 120 Mt por año en 2029. El total de movimiento disminuye desde 2049 hasta 2053, reflejando el agotamiento de las reservas.

Figura 21

Plan de producción – Caso DBs

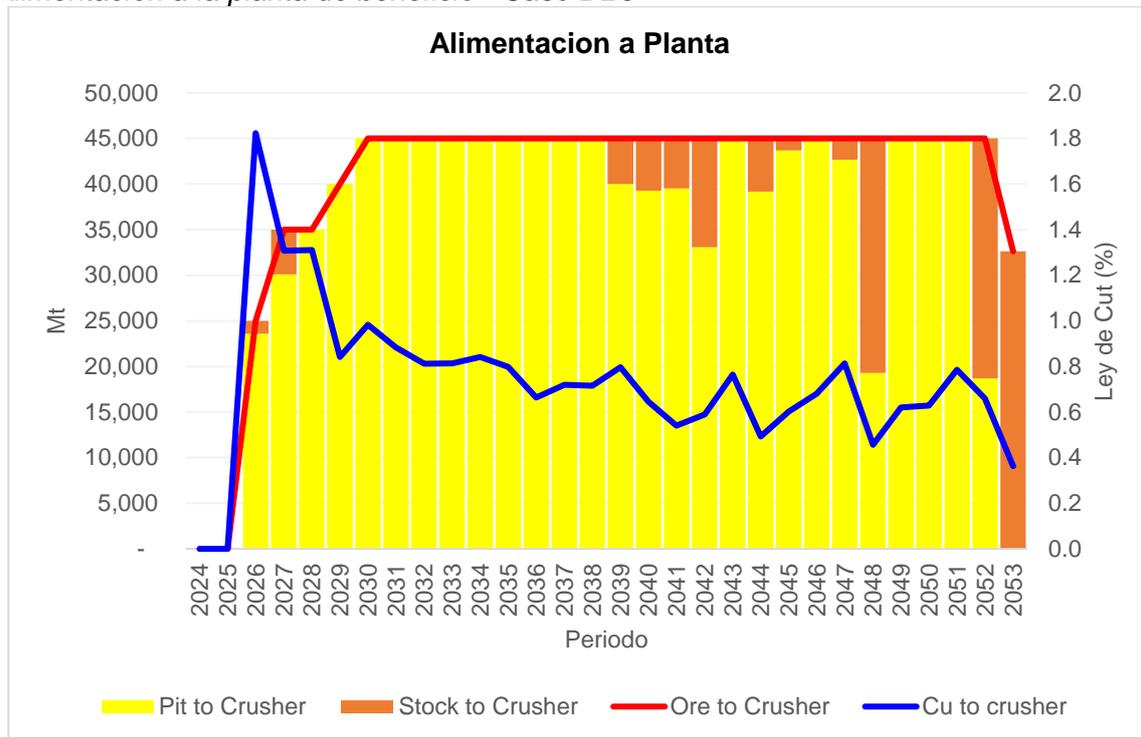


Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se analiza cómo varía la ley de cobre (%) a lo largo de la vida útil de la mina. Comienza con leyes de cobre superiores al 2.0%, pero disminuyen hasta llegar a 0.5% en los últimos años, ver Figura 22.

Figura 22

Alimentación a la planta de beneficio - Caso DBs



Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Evaluación económica

En la Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se presenta el flujo de caja derivado del plan de producción del "Caso DBS". Se observa que la rentabilidad es más alta durante los primeros 5 años de producción (de 2026 a 2030), y luego disminuye debido a la menor producción de cobre. El ingreso total por la venta de cobre asciende a 32,808 millones de dólares estadounidenses (MUSD\$), lo que, aplicando una tasa del 10%, resulta en un valor presente neto de 12,263 MUSD\$ durante la vida útil de la mina.

Por otro lado, la Figura 23 ilustra el comportamiento del VAN en periodos acumulativos de 5 y 10 años. Durante los primeros 5 años, el VAN es de 4,529 MUSD\$, y en los primeros 10 años alcanza los 8,488 MUSD\$. Desde la perspectiva de un inversor, el valor del proyecto en los primeros 5 años es crucial, especialmente en el contexto de la amortización de deudas de inversión.

Figura 23

Valor presente Neto - Caso DBs

VAN (Caso DBS)	MUSD\$
<u>VAN@LOM</u>	12,263
<u>VAN@5años</u>	4,529
<u>VAN@10años</u>	8,488

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Flujo caja del Caso DBs - 2024 al 2033

Destino	Unid	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Ore to Crusher	kt	-	-	25,000	35,000	35,000	40,000	45,000	45,000	45,000	45,000
Cut	%	-	-	1.82	1.31	1.31	0.84	0.98	0.88	0.81	0.81
Mo	ppm	-	-	221	169	121	509	111	129	199	269
Au	ppb	-	-	58	41	34	85	32	34	40	44
Ag	ppm	-	-	2.2	2.0	2.3	2.4	1.8	1.9	2.2	2.7
Costo Proc.	\$/ton	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Costo Minado	\$/ton	1.53	1.56	1.66	1.72	1.68	1.72	1.70	1.74	1.87	1.86
Costo Reh.	\$/ton	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
G&A	\$/ton	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Revenue	\$/ton	-	-	105.4	74.8	74.4	54.7	55.8	50.5	47.6	48.7
Pit to Crusher	kt	-	-	23,592	30,107	35,000	40,000	45,000	45,000	45,000	45,000
Stock to Crusher	kt	-	-	1,408	4,893	-	-	-	-	-	-
Ore to stock	kt	-	1,739	7,352	-	169	188	228	7,786	22,636	13,039
Waste	kt	50,000	88,261	57,656	55,069	54,921	79,765	74,803	67,543	52,813	61,961
Total, Minado	kt	50,000	90,000	88,600	85,176	90,090	119,952	120,031	120,329	120,449	120,000
Total, Movido	kt	50,000	90,000	90,008	90,069	90,090	119,952	120,031	120,329	120,449	120,000
Ingreso	M\$	-	-	2,634	2,617	2,603	2,188	2,511	2,274	2,140	2,190
Costos	M\$	77	140	448	569	571	686	745	749	765	763
Flujo Caja	M\$	- 77	- 140	2,186	2,048	2,032	1,502	1,766	1,525	1,375	1,427
Factor Desc		1.000	0.909	0.826	0.751	0.683	0.621	0.564	0.513	0.467	0.424
Flujo Caja desc.	M\$	- 77	- 128	1,807	1,539	1,388	932	997	782	641	605

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15*Flujo caja del Caso Base - 2034 al 2043*

Destino	Unid	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
Ore to Crusher	kt	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000
Cut	%	0.84	0.80	0.66	0.72	0.72	0.80	0.65	0.54	0.59	0.76
Mo	ppm	270	198	228	232	149	192	162	203	166	51
Au	ppb	47	39	40	35	34	50	46	46	39	19
Ag	ppm	2.8	2.3	2.2	2.5	2.1	2.2	2.0	1.8	1.7	1.2
Costo Proc.	\$/ton	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Costo Minado	\$/ton	1.94	1.97	2.09	2.18	2.01	1.96	2.01	2.03	1.98	1.82
Costo Reh.	\$/ton	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
G&A	\$/ton	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Revenue	\$/ton	50.3	46.8	40.2	42.4	41.0	46.3	38.1	32.7	34.3	42.1
Pit to Crusher	kt	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	39,998	39,260	39,509	33,065	45,000
Stock to Crusher	kt	-	-	-	-	-	5,002	5,740	5,491	11,935	-
Ore to stock	kt	15,612	6,619	373	7,883	1,442	-	-	-	-	4,621
Waste	kt	59,388	68,710	74,868	67,117	73,505	75,317	74,931	75,491	74,935	71,325
Total Minado	kt	120,000	120,329	120,241	120,000	119,947	115,315	114,191	115,000	108,000	120,946
Total Movido	kt	120,000	120,329	120,241	120,000	119,947	120,317	119,931	120,491	119,935	120,946
Ingreso	M\$	2,265	2,104	1,808	1,909	1,846	2,084	1,712	1,473	1,544	1,893
Costos	M\$	773	777	791	801	780	769	772	777	761	760
Flujo Caja	M\$	1,492	1,328	1,016	1,108	1,065	1,315	940	696	784	1,133
Factor Desc		0.386	0.350	0.319	0.290	0.263	0.239	0.218	0.198	0.180	0.164
Flujo Caja desc.	M\$	575	465	324	321	281	315	205	138	141	185

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16*Flujo caja del Caso Base - 2044 al 2053*

Destino	Unid	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053
Ore to Crusher	kt	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	45,000	32,602
Cut	%	0.49	0.60	0.68	0.81	0.46	0.62	0.63	0.79	0.66	0.36
Mo	ppm	99	123	136	155	108	212	337	251	192	97
Au	ppb	24	23	28	37	27	35	37	35	31	21
Ag	ppm	1.8	2.5	2.6	2.5	1.6	2.2	2.3	2.8	2.2	1.6
Costo Proc.	\$/ton	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Costo Minado	\$/ton	1.99	2.16	2.26	2.27	2.11	2.39	2.70	3.01	3.25	-
Costo Reh.	\$/ton	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	2.33
G&A	\$/ton	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Revenue	\$/ton	28.3	34.8	39.2	45.7	26.5	37.0	39.3	46.6	38.8	15.6
Pit to Crusher	kt	39,180	43,683	45,000	42,659	19,270	45,000	45,000	45,000	18,696	-
Stock to Crusher	kt	5,820	1,317	-	2,341	25,730	-	-	-	26,304	32,602
Ore to stock	kt	-	-	1,380	-	-	11,616	16,140	9,759	-	-
Waste	kt	74,820	74,817	73,706	75,692	74,730	53,384	32,860	4,672	3,388	-
Total, Minado	kt	114,000	118,500	120,087	118,351	94,000	110,000	94,000	59,431	22,084	-
Total, Movido	kt	119,820	119,817	120,087	120,692	119,730	110,000	94,000	59,431	48,388	32,602
Ingreso	M\$	1,272	1,565	1,765	2,059	1,193	1,665	1,768	2,096	1,744	510
Costos	M\$	770	796	812	809	753	803	794	719	626	467
Flujo Caja	M\$	502	768	953	1,249	441	861	975	1,378	1,118	43
Factor Desc		0.149	0.135	0.123	0.112	0.102	0.092	0.084	0.076	0.069	0.063
Flujo Caja desc.	M\$	75	104	117	139	45	80	82	105	78	3

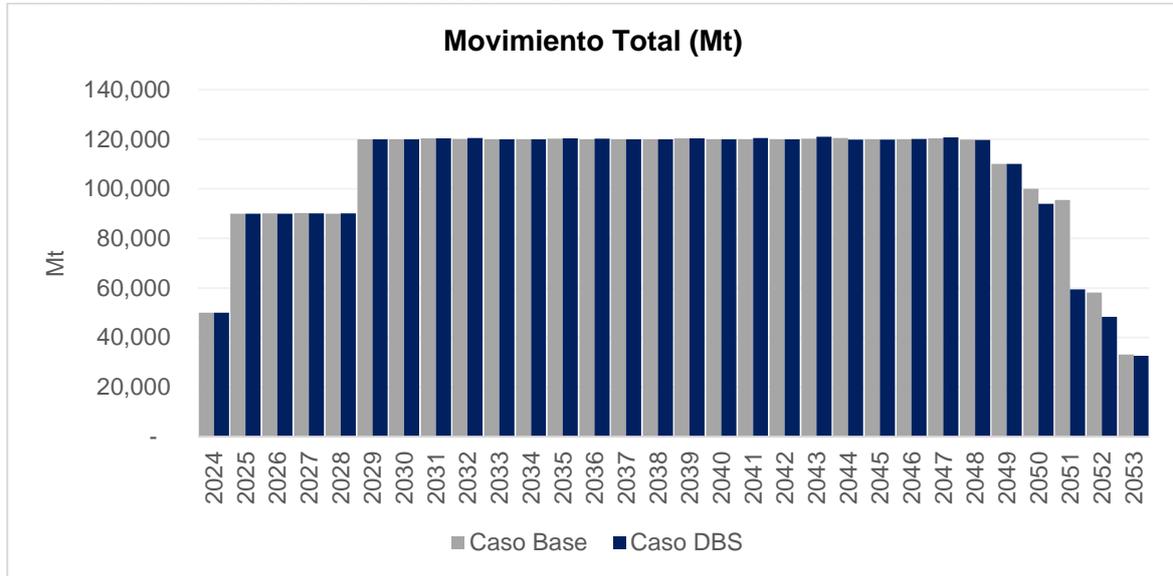
Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Producción Mina

Figura 1

Movimiento Total Caso Base vs Caso DBS



Fuente: Elaboración propia

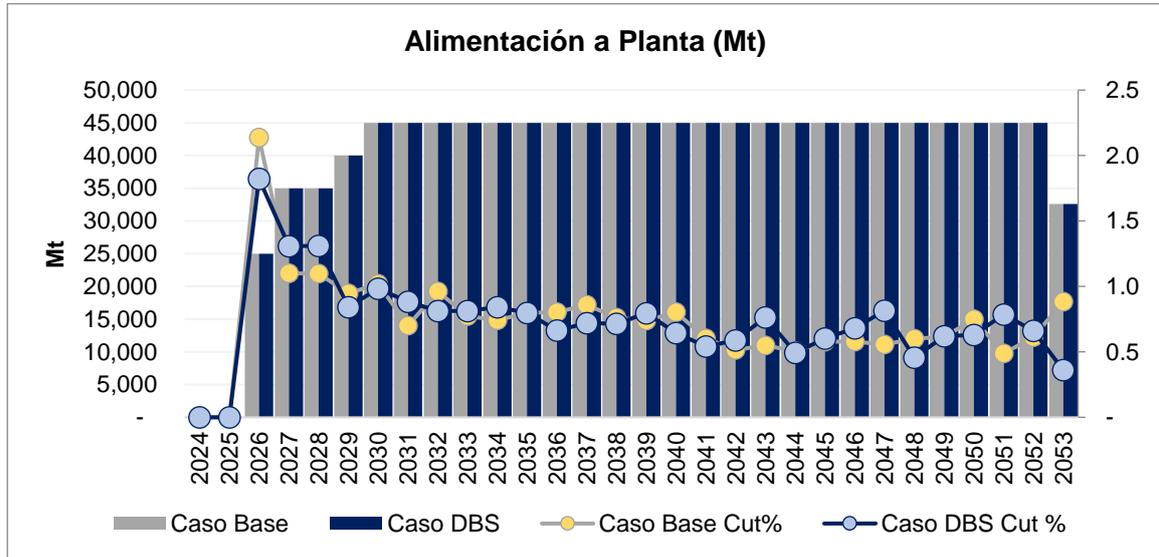
El movimiento total de ambos casos en desarrollo se muestra en la Figura 24 , donde se observa que:

- En ambos casos se observa un aumento en el movimiento desde 2024 hasta 2028, alcanzando la capacidad máxima de 120 Mt/año.
- Ambos casos tienen una vida útil de 30 años, con una disminución del movimiento a partir de 2049.
- En cuanto a los costos, ambos casos presentan un movimiento similar cada año, lo que implica que los costos de minado o movimiento de material son consistentes en todos los años.

4.2 Alimentación a la planta

Figura 25

Alimentación a la Planta – Caso Base vs Caso DBS



Fuente: Elaboración propia

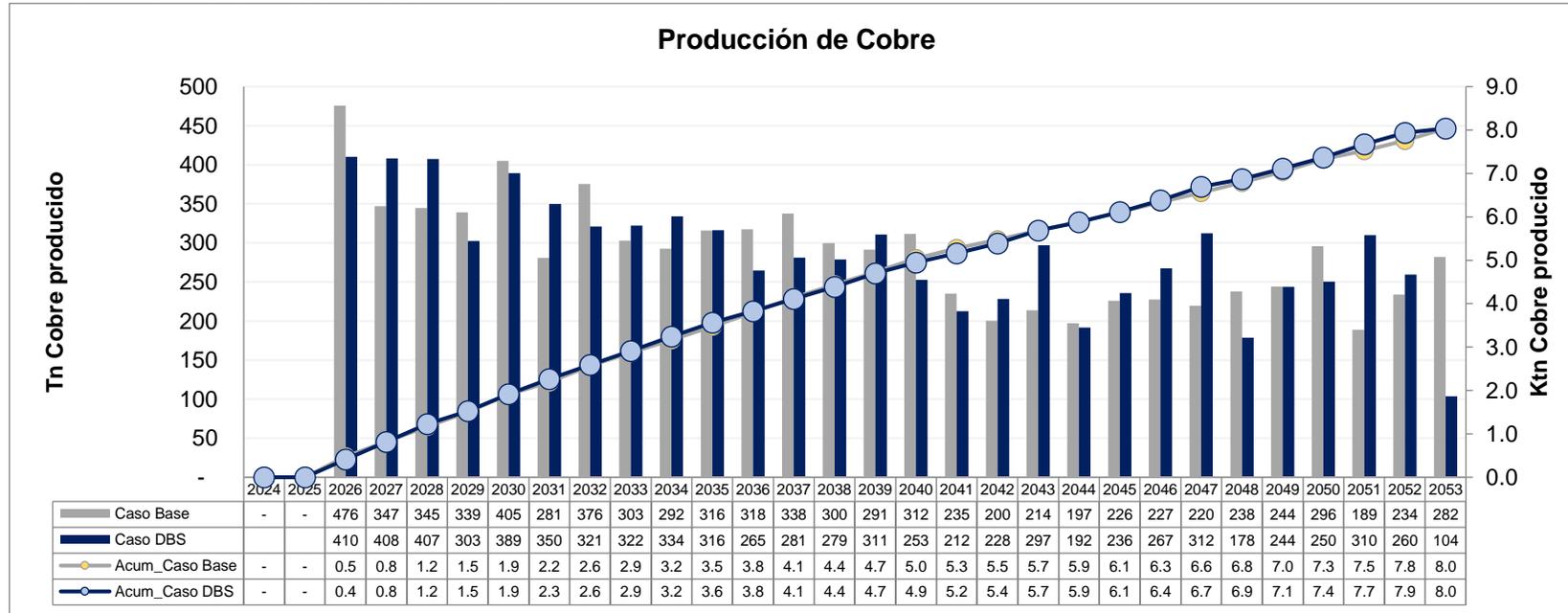
La Figura 25 muestra la alimentación a la planta de ambos casos, se observa que:

- Ambos casos muestran un aumento progresivo en la alimentación a la planta desde 2026 hasta 2029, alcanzando su máxima capacidad a partir de 2030.
- En el primer año de alimentación, el caso Base procesa mineral con una ley promedio del 2.1 cut%, superando la ley promedio del 2 cut% del caso DBS.
- En los años 2027 y 2028, la ley promedio de cobre del caso DBS (1.3 cut%) es mejor que la ley procesada por el caso Base (1.1 cut%).
- Ambos casos procesan la misma cantidad de mineral (1,203 Mt) con una ley promedio del 0.76 cut%, ya que se desarrollan en el mismo pit final, variando la secuencia de extracción según la estrategia de cada algoritmo matemático.

4.3 Perfil de Producción de Cobre

Figura 26

Producción de cobre – Caso Base vs Caso DBS



Fuente: Elaboración propia

La Figura 26 muestra la producción de cobre en ambos casos, se observa que:

Ambos casos muestran una producción acumulada de 8,039 tn de cobre vendible.

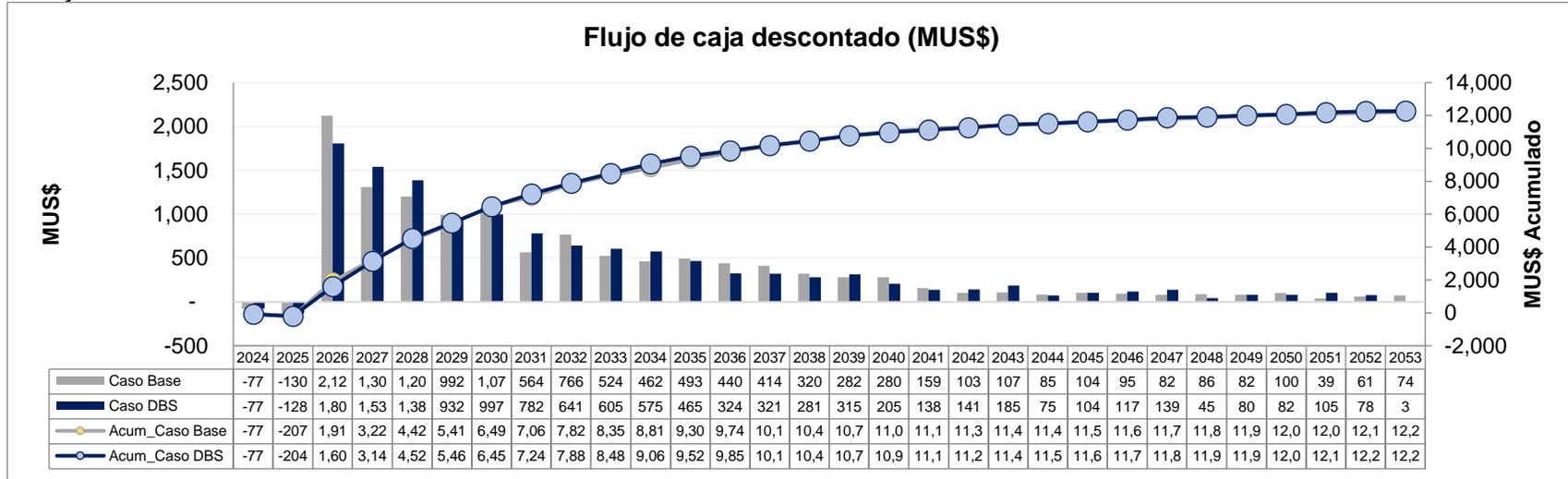
La producción acumulada durante los primeros 5 años del caso DBS es de 1,226 tn de cobre, superando la producción del caso Base que es de 1,168 tn.

En el año 2026, la producción del caso Base es de 476 tn de cobre, mayor que los 410 tn de cobre del caso DBS; esta diferencia se debe a la ley de cabeza de cobre procesada en dicho período.

4.4 Valor económico

Figura 27

Flujo de caja descontado – Caso Base vs Caso DBS



Fuente: Elaboración propia

La Figura 27 muestra el flujo descontado en ambos casos, se observa que:

- Los primeros dos años (2024 y 2025) muestran flujos de caja negativos debido al pre-stripping.
- En cuanto al flujo de caja descontado del proyecto, el caso DBS alcanza un valor presente neto de 12,263 MUS\$, lo que lo sitúa 45 MUS\$ por encima del caso Base.
- En términos del valor del proyecto en los primeros 5 años, el caso DBS logra un valor presente de 4,529 MUS\$, superando al caso Base en 103 MUS\$.
- Respecto al valor del proyecto en los primeros 10 años, el caso DBS alcanza un valor presente de 8,488 MUS\$, superando al caso Base en 138 MUS\$.

Conclusiones

Del presente trabajo de suficiencia, se concluye:

El secuenciamiento global del planeamiento minero a largo plazo, tal como se evidencia en los hallazgos del caso DBS, resulto un aumento de 45 MUS\$ al valor económico del proyecto minero (VAN), en comparación con la metodología convencional de la planificación, representada por el caso Base.

La producción de cobre del caso DBS, es mayor en los primeros 5 años en comparación al caso base, lo cual se refleja en los resultados del VAN durante ese mismo periodo. El caso DBS incorpora un flujo caja descontado de 4,529 MUS\$, lo que representa un aumento de 103 MUS\$ en comparación al caso Base (+2.3%).

Aunque ambos casos producen 8,214 kt de cobre recuperado en todos los años de operación, el caso DBS opta por una mayor producción de cobre en los primeros 5 años al exponer mineral de más alta ley de cobre durante este periodo y postergando los de menor ley de cobre en los años posteriores.

Se ha añadido una nueva dirección de valor a la secuencia de fases mineras, el cual propone 9 fases mineras centradas en la extracción de leyes con mayor metal disponible, lo que aumenta el valor del proyecto en un +2.3% en comparación con el caso Base, en los primeros 5 años de producción.

Desde la perspectiva del inversionista, obtener mayores ingresos durante los primeros años de operación no solo acorta el período de recuperación de la inversión, sino que también facilita la reinversión del capital en otros proyectos mineros.

Desde la perspectiva de los trabajadores mineros, obtener mayores ingresos en los primeros años garantiza mejores compensaciones económicas, lo que a su vez contribuye a mejorar la calidad de vida tanto en el trabajo como en el ámbito familiar.

El ingeniero responsable de la planificación minera a cielo abierto debe mantener una motivación constante para explorar nuevas herramientas y algoritmos que puedan mejorar el proceso de secuenciación de la mina. Esto se hace con la intención de aumentar

el valor económico de la empresa, reducir el riesgo de incertidumbre y asegurar la eficacia de las operaciones mineras.

Recomendaciones

Del presente trabajo de suficiencia, se recomienda:

Fomentar la aplicación del secuenciamiento global, con mayor énfasis a los yacimientos con mayor variabilidad de leyes, como por ejemplo yacimiento Skarn. En los yacimientos homogéneos, como los pórfidos, donde se encuentra la misma ley en los bancos o zonas de minado, el impacto del secuenciamiento global sería mínimo, independientemente de la estrategia de minado empleada.

El ingeniero de planificación debe priorizar la maximización del Valor Presente Neto de cada proyecto minero, manteniendo un equilibrio entre la rentabilidad y la viabilidad operativa, así como la gestión del riesgo asociado a cada estrategia. Por lo tanto, es fundamental promover la creación de laboratorios especializados en el desarrollo de nuevos algoritmos que ayuden a encontrar soluciones óptimas para cada unidad minera.

Además de utilizar el Valor Presente Neto como medida de evaluación, es importante buscar indicadores adicionales que permitan comparar diversos casos de estudio con respecto a un caso base. Estos indicadores adicionales pueden proporcionar al ingeniero de minas información adicional y perspectivas más claras para tomar decisiones más informadas tanto en el presente como en el futuro.

Referencias bibliográficas

- Cerchiaro, I (2017). Aplicación del software doppler en un proyecto minero hipotético de un yacimiento polimetálico.
- Cortez, C (2022). Determinación de la secuencia de minado y remanejo de stocks para el tratamiento de óxidos y de sulfuros en una mina de cobre a tajo abierto.
- Hustruild W. (1995) Open pit mine Planning Design.
- Llorente, C (2018). Diseño económico óptimo para la extracción a cielo abierto de una masa mineral fuera del proyecto minero “Las Cruces”.
- Mining Math. (2017) www.miningmath.com
- Niño, C (2017). Maximización de valor a través de la optimización del diseño de fases y plan de producción de una mina a tajo abierto.
- Ormazábal, C (2019). Aplicación del agendamiento de bloques como guía para selección de fases.
- Parra, A (2015). Planificación minera a cielo abierto utilizando fundamentos geomecánicas.
- Quispe, C (2019). Optimización en el planeamiento a largo plazo, con la programación directa de bloques frente a la metodología de planeamiento tradicional.
- Thompson, R. (2011). Design, Construction and Maintenance of Haul Road. In Darling, P. (Ed.), SME Mining Engineering Handbook (3rd ed., Chapter 10, pp. 957-977). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Whittle, G (2010). Enterprise Optimisation.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Secuencia de minado Caso Base	1

Anexo 1: Secuencia de minado Caso Base



Ilustración 1 Minado 2024 – Caso Base

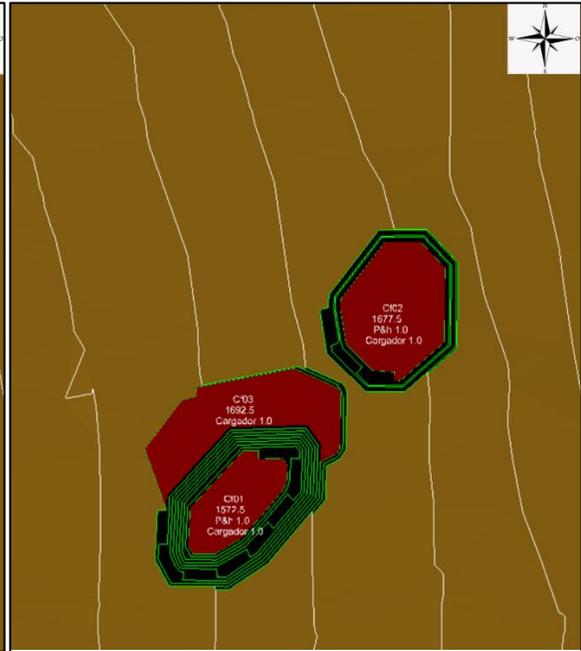


Ilustración 2 Minado 2025 – Caso Base



Ilustración 3 Minado 2026 – Caso Base

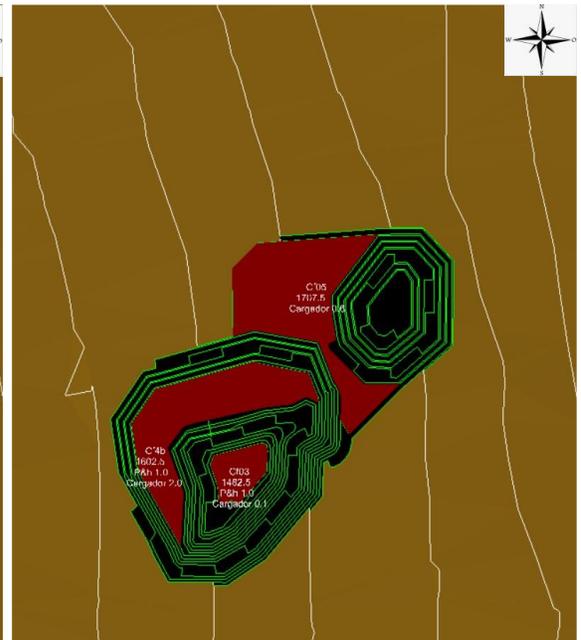


Ilustración 4 Minado 2027 – Caso Base



Ilustración 5 Minado 2028 – Caso Base



Ilustración 6 Minado 2029 – Caso Base



Ilustración 7 Minado 2030 – Caso Base

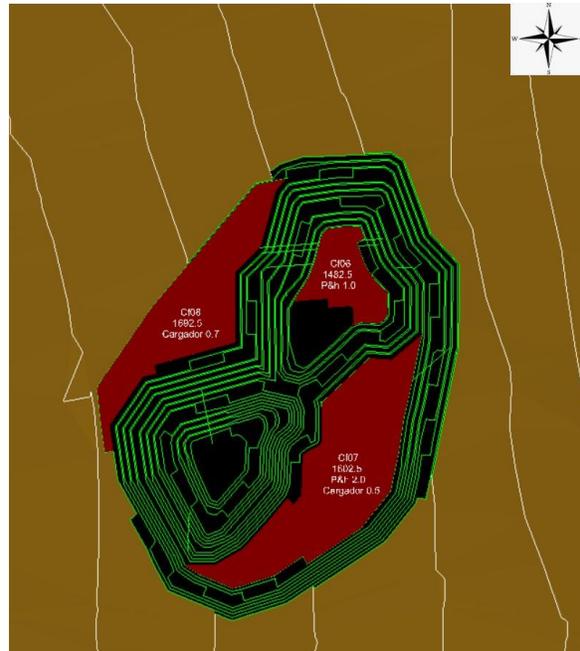


Ilustración 8 Minado 2031 – Caso Base



Ilustración 9 Minado 2032 – Caso Base



Ilustración 10 Minado 2033 – Caso Base



Ilustración 11 Minado 2034 – Caso Base



Ilustración 12 Minado 2035 – Caso Base



Ilustración 13 Minado 2036 – Caso Base



Ilustración 14 Minado 2037 – Caso Base

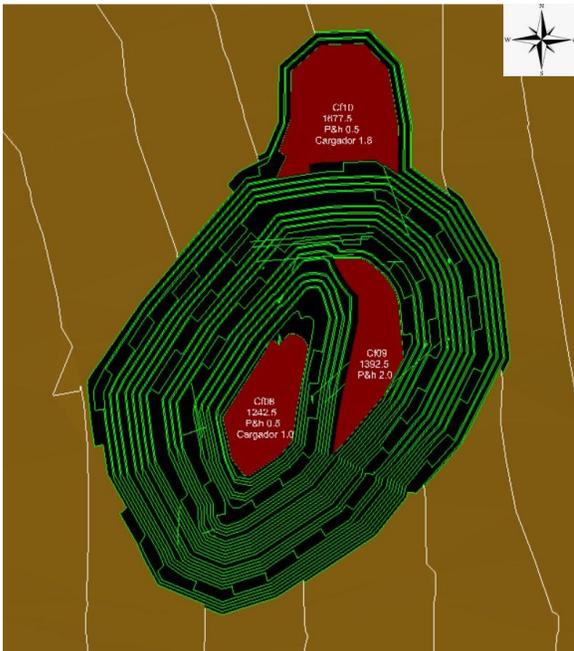


Ilustración 15 Minado 2038 – Caso Base



Ilustración 16 Minado 2039 – Caso Base

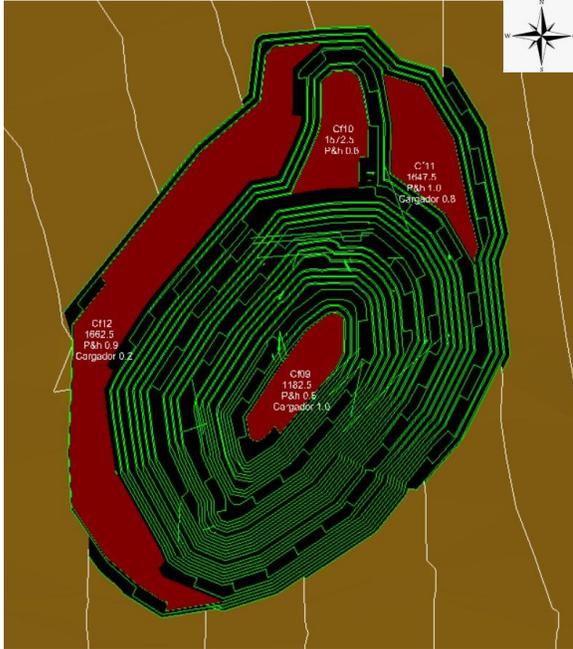


Ilustración 17 Minado 2040 – Caso Base

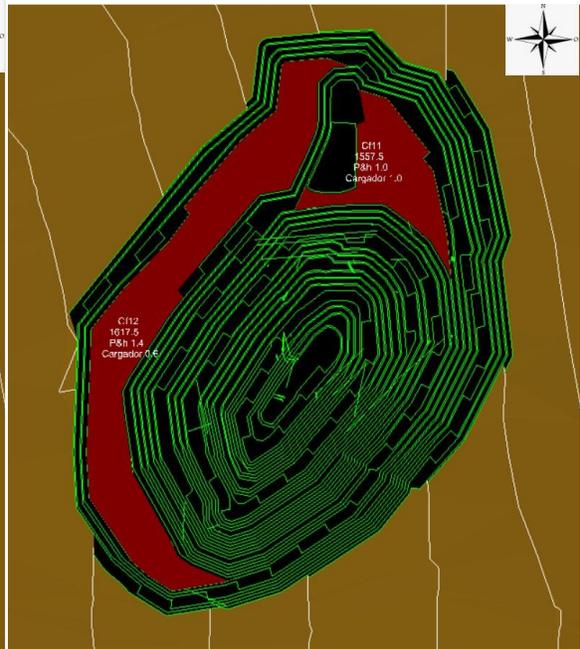


Ilustración 18 Minado 2041 – Caso Base

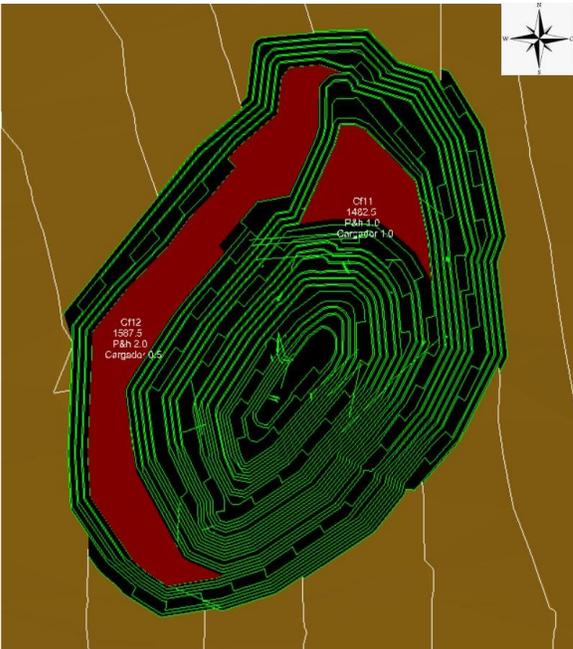


Ilustración 19 Minado 2042– Caso Base



Ilustración 20 Minado 2043 – Caso Base



Ilustración 21 Minado 2044 – Caso Base

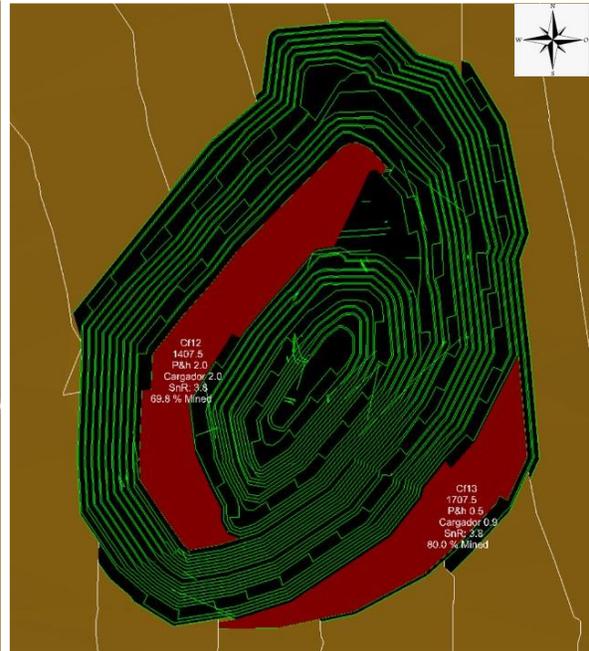


Ilustración 22 Minado 2045 – Caso Base



Ilustración 23 Minado 2046 – Caso Base

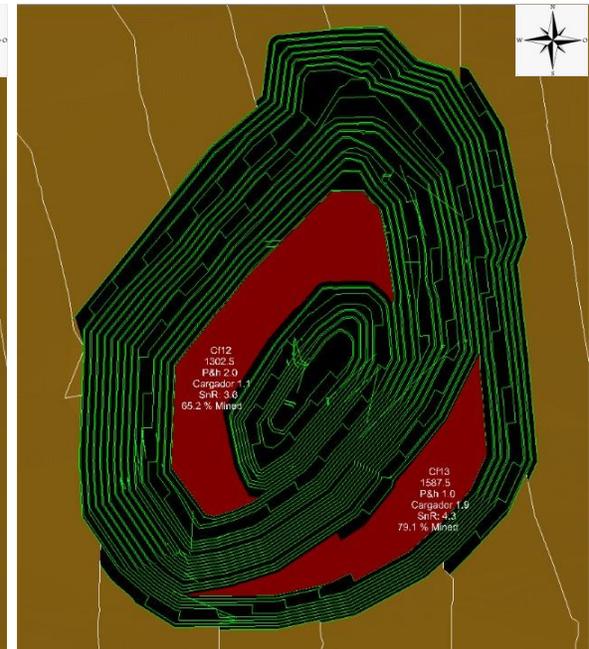


Ilustración 24 Minado 2047 – Caso Base



Ilustración 25 Minado 2048 – Caso Base



Ilustración 26 Minado 2049 – Caso Base



Ilustración 27 Minado 2050 – Caso Base



Ilustración 28 Minado 2051 – Caso Base



Ilustración 29 Minado 2052 – Caso Base



Ilustración 30 Minado 2053 – Caso Base

ANEXO 02: Secuencia de minado Caso DBS



Ilustración 31 Minado 2024 – Caso DBS

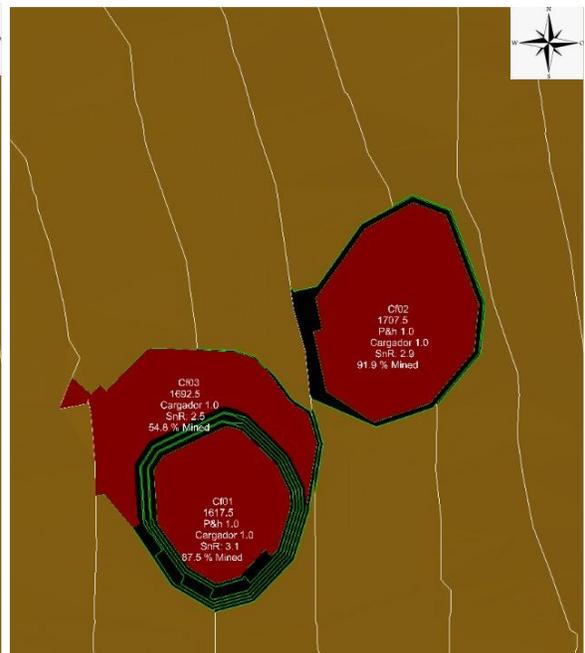


Ilustración 32 Minado 2025 – Caso DBS



Ilustración 33 Minado 2026 – Caso DBS



Ilustración 34 Minado 2027 – Caso DBS



Ilustración 35 Minado 2028 – Caso DBS



Ilustración 36 Minado 2029 – Caso DBS



Ilustración 37 Minado 2030 – Caso DBS



Ilustración 38 Minado 2031 – Caso DBS



Ilustración 39 Minado 2032 – Caso DBS

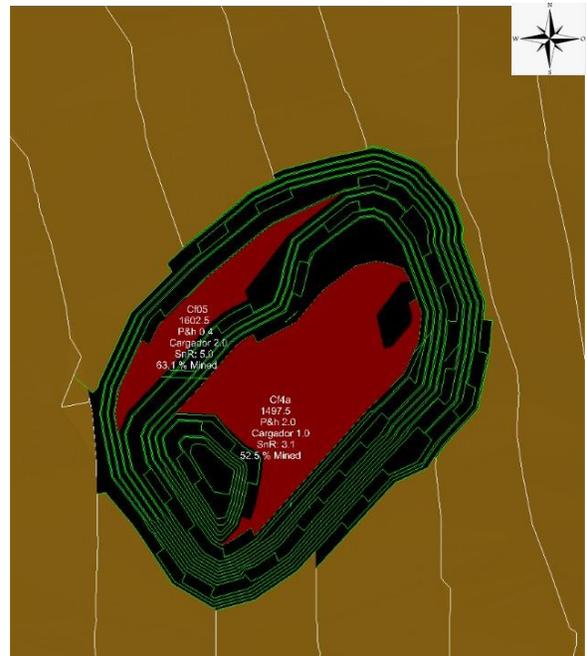


Ilustración 40 Minado 2033 – Caso DBS



Ilustración 41 Minado 2024 – Caso DBS

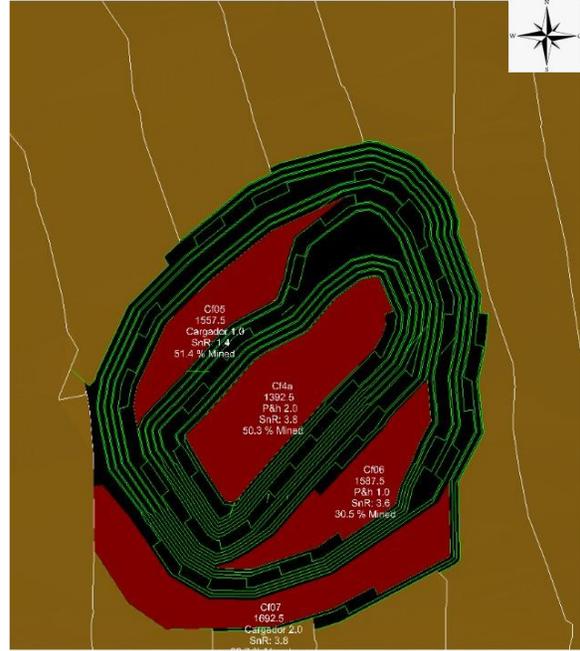


Ilustración 42 Minado 2025 – Caso DBS

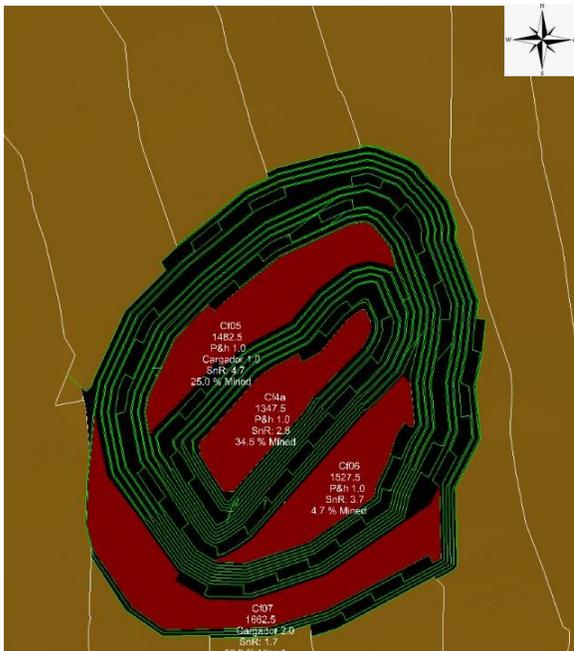


Ilustración 43 Minado 2026 – Caso DBS

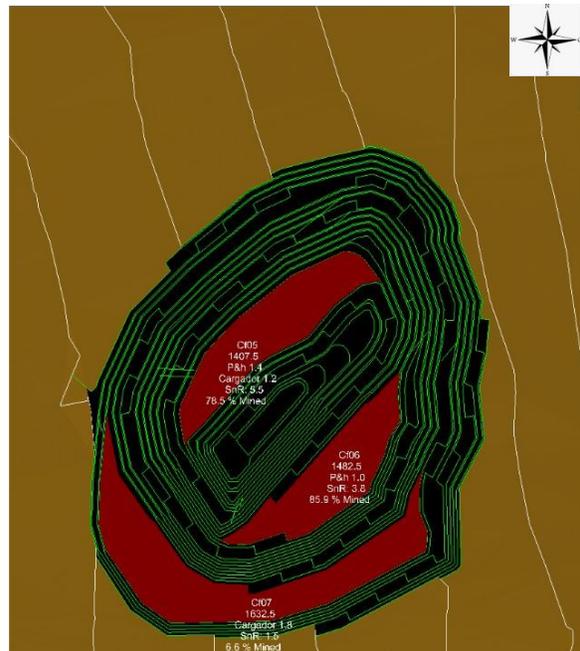


Ilustración 44 Minado 2027 – Caso DBS

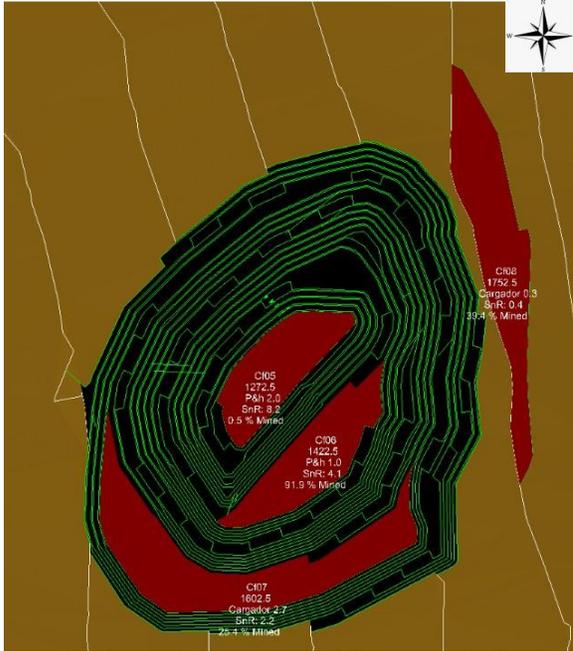


Ilustración 45 Minado 2038 – Caso DBS



Ilustración 46 Minado 2039 – Caso DBS

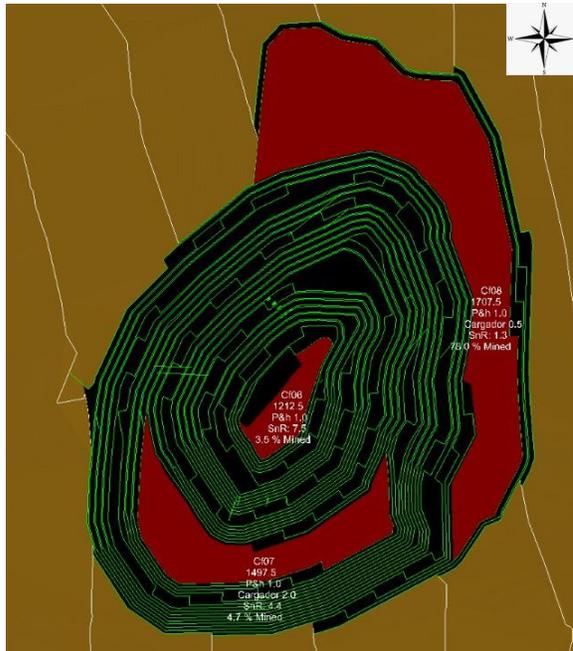


Ilustración 47 Minado 2040 – Caso DBS



Ilustración 48 Minado 2041 – Caso DBS



Ilustración 49 Minado 2042 – Caso DBS

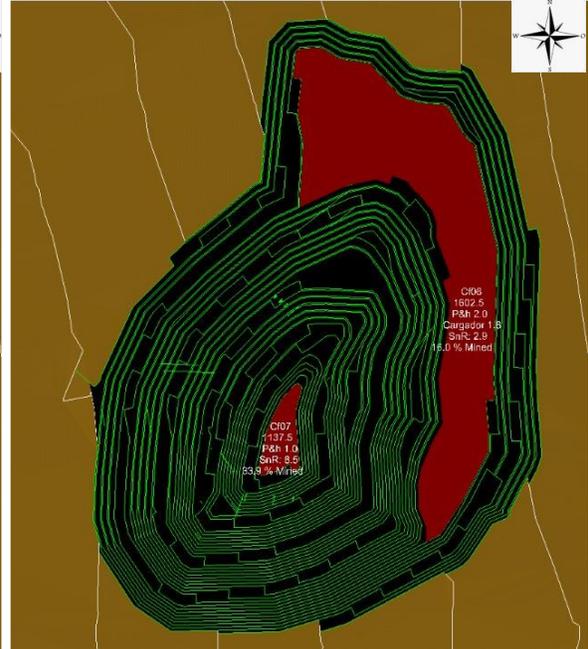


Ilustración 50 Minado 2043 – Caso DBS



Ilustración 51 Minado 2044 – Caso DBS

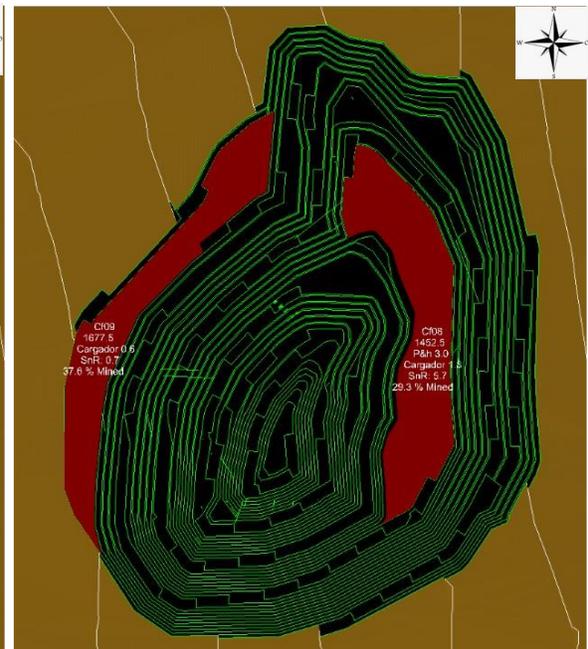


Ilustración 52 Minado 2045 – Caso DBS

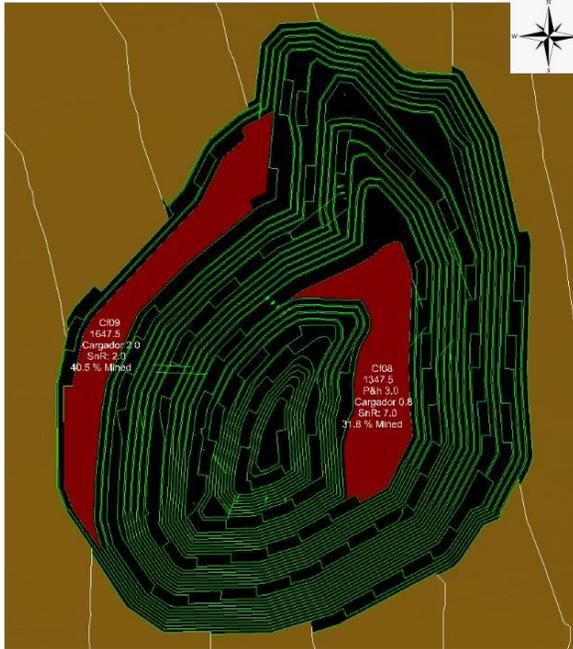


Ilustración 53 Minado 2046 – Caso DBS



Ilustración 54 Minado 2047 – Caso DBS



Ilustración 55 Minado 2048 – Caso DBS



Ilustración 56 Minado 2049 – Caso DBS



Ilustración 57 Minado 2050 – Caso DBS

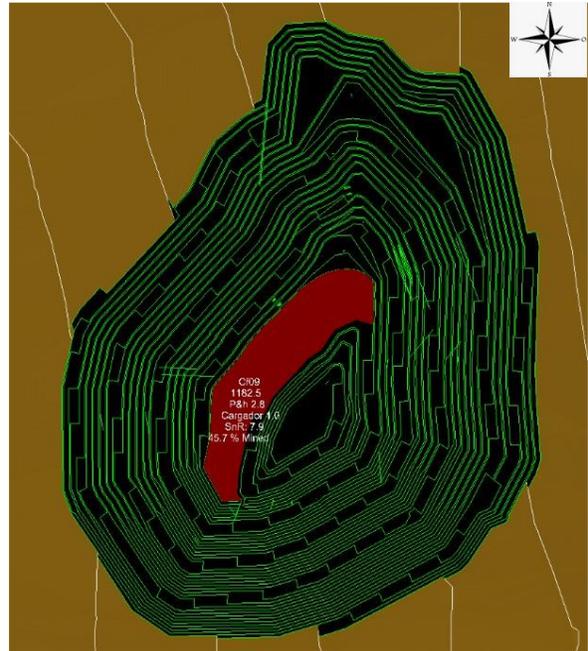


Ilustración 58 Minado 2051 – Caso DBS

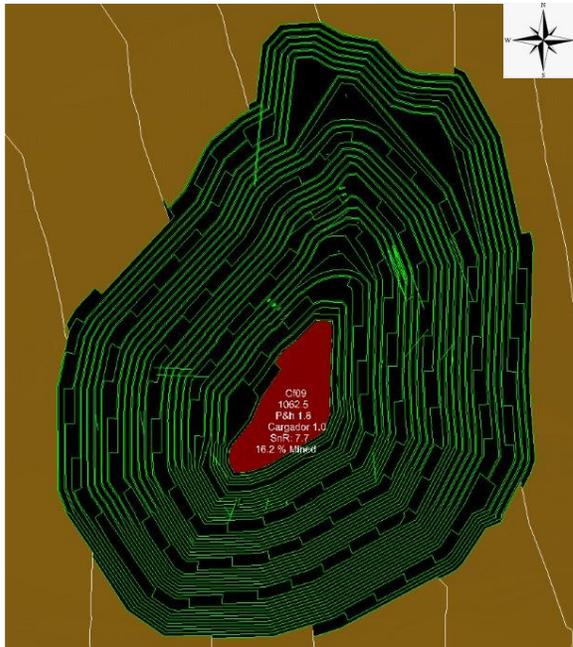


Ilustración 59 Minado 2052 – Caso DBS



Ilustración 60 Minado 2053 – Caso DBS