

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Optimización del valor presente neto de las reservas minables en
la unidad minera Constancia a través del redireccionamiento de
sus fases de minado**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Gerson Gerald Carhuapoma Miranda

 [0009-0005-8818-8355](https://orcid.org/0009-0005-8818-8355)

Asesor

M.Sc. Ernán Máximo Capcha Milla

 [0000-0002-5399-1317](https://orcid.org/0000-0002-5399-1317)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Carhuapoma Miranda [1]
Referencia/Reference	[1] G. Carhuapoma Miranda, " <i>Optimización del valor presente neto de las reservas minables en la unidad minera Constancia a través del redireccionamiento de sus fases de minado</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Carhuapoma, 2024)
Referencia/Reference	Carhuapoma, G. (2024). <i>Optimización del valor presente neto de las reservas minables en la unidad minera Constancia a través del redireccionamiento de sus fases de minado</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi padre,

Tu ejemplo de sabiduría siempre ha sido mi guía. Aunque hoy no estés físicamente aquí para celebrar este logro, cada paso que doy en mi carrera lleva impreso tu admiración y amor. Sé que estarías orgulloso de ver hasta dónde he llegado, y es tu recuerdo el que me impulsa a seguir adelante. Este logro es tan tuyo como mío, y te lo dedico con todo mi corazón.

Agradecimiento

A mis padres, cuyo amor y apoyo incondicional han sido mi constante en los momentos más desafiantes; y a mis hermanos, Albert y Bryan, que han compartido conmigo más que un lazo sanguíneo, una química vital en mi estabilidad motivacional durante mi trayectoria académica. Su fe en mí, su paciencia y su soporte han enriquecido mi viaje hacia este logro. Gracias por ser mi fortaleza en cada paso de este viaje

Resumen

El trabajo de tesis "Optimización del Valor Presente Neto de las Reservas Minables en la Unidad Minera Constancia a través del redireccionamiento de sus fases de minado" propone una metodología para incrementar el valor económico de las operaciones mineras mediante el ajuste estratégico de las fases de minado, considerando las capacidades operativas de la mina y la planta de procesamiento. El presente trabajo se centra en la investigación de las mejores prácticas para optimizar la secuencia en que se extraen los recursos minerales en un tajo para optimizar los retornos financieros de una compañía minera a través de un análisis que integra algoritmos de optimización avanzados.

El estudio se apoya en un marco teórico que discute la importancia del entorno corporativo en la planificación minera, la relevancia del secuenciamiento de minado, y las prácticas de evaluación económica de proyectos mineros, incluyendo el Análisis de Flujo de Caja Descontado (DCF). También se evalúa cómo los métodos de optimización de pit más conocidos como el de Lerchs-Grossmann pueden ser utilizados como una base sobre la cual medir nuestras posibles mejoras al valor presente neto ante la implementación de la metodología propuesta.

El análisis práctico se realiza en la Unidad Minera Constancia, donde se aplican algoritmos emergentes para redireccionar las fases de minado bajo las condiciones de su capacidad de producción, tanto en términos de tonelaje movido en mina como de procesado en planta. Se comparan los resultados económicos antes y después del redireccionamiento, proporcionando evidencia de que las modificaciones estratégicas en la planificación pueden sostener o mejorar los niveles de producción de cobre a corto plazo, lo cual permite mitigar riesgos en las metas de producción de metal de interés por factores ajenos a la planificación.

Este enfoque integrador no solo pretende maximizar el Valor Presente Neto (VPN) de las reservas minables sino también asegurar la sostenibilidad económica y responsabilidad operativa y ambiental en el largo plazo. La tesis concluye destacando la necesidad de una

continua adaptación y mejora de las técnicas de planificación minera e invita a seguir investigando para seguir respondiendo a los desafíos operativos y financieros en la industria minera.

Palabras clave — Valor, fases, mina, planta.

Abstract

The thesis titled "Optimization of the Net Present Value of Mineable Reserves at the Constancia Mining Unit through the Redirection of Its Mining Phases" proposes a methodology for increasing the economic value of mining operations through strategic adjustments to mining phases, taking into consideration the operational capacities of the mine and the processing plant. The research focuses on best practices to optimize the sequence of mineral extraction to enhance the financial returns of a mining company through an analysis integrating advanced optimization algorithms.

The theoretical framework discusses the significance of corporate environments in mining planning, the importance of mining sequencing, and economic evaluation practices for mining projects, including Discounted Cash Flow (DCF) analysis. The practical analysis is conducted at the Constancia Mining Unit, applying emerging algorithms for phase redirection under production capacity conditions. The study compares economic outcomes before and after phase redirection, illustrating that strategic planning modifications can sustain or enhance short-term copper production levels, thereby mitigating risks associated with movement and metal production targets.

The practical analysis is conducted at the Constancia Mining Unit, where emerging algorithms are applied to redirect mining phases under production capacity conditions, both in terms of tonnage moved in the mine and processed in the plant. Economic results are compared before and after redirection, providing evidence that strategic modifications in planning can sustain or improve short-term copper production levels, thereby mitigating risks to metal production targets due to factors unrelated to planning.

This integrative approach aims not only to maximize the Net Present Value (NPV) of the mineable reserves but also to ensure long-term economic sustainability and operational and environmental responsibility. The thesis concludes by highlighting the need for continuous adaptation and improvement of mining planning techniques and invites further

research to continue responding to operational and financial challenges in the mining industry.

Keywords — Value, phases, mine, plant.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivos del estudio.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Antecedentes investigativos.....	3
1.4.1 Antecedentes internacionales.....	3
1.4.2 Antecedentes nacionales.....	4
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	5
2.1 Marco teórico.....	5
2.1.1 Entorno corporativo en la planificación minera.....	5
2.1.2 Importancia del secuenciamiento.....	7
2.1.3 Planeamiento de minado a corto y largo plazo.....	8
2.1.4 Evaluación económica de proyectos mineros.....	10
2.2 Marco conceptual.....	12
2.2.1 Optimización de Pits.....	12
2.2.2 Valorización de bloques.....	16
2.2.3 Evaluación de Riesgos y Costos.....	17
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	20
3.1 Hipótesis.....	20
3.1.1 Hipótesis general.....	20
3.1.2 Hipótesis específicas.....	20

3.2	Estudiando el cálculo de envolventes económicas en tajo abierto	20
3.2.1	Problemas distintos para yacimientos distintos	20
3.2.2	Entendiendo los algoritmos tradicionales (Lerchs and Grossmann)	21
3.2.3	Ilustrando la lógica tradicional	24
3.2.4	Sesgo de algunos algoritmos de optimización de pit.....	26
3.3	Inclusión de la temporalidad como input de cálculo de envolventes.....	28
3.3.1	Variables de restricción en el tiempo.....	28
3.3.2	Capacidad de mina y capacidad de planta.....	29
3.3.3	Impacto en el Flujo de Planificación Minera	30
3.3.4	Ejemplificación.....	31
3.4	Tendencias y visualización al futuro.....	36
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		38
4.1	Disclaimers en la exposición de resultados.....	38
4.1.1	Comentarios a la confidencialidad de data.....	38
4.1.2	Alteración de números	38
4.2	Aplicación en envolventes económicas de U.M. Constancia.....	39
4.2.1	Direccionamiento de fases al Plan de 5 Años (5Y).....	41
4.2.2	Direccionamiento de fases para Ampliación de Reservas.....	43
4.3	Comentarios a resultados	45
Conclusiones		48
Recomendaciones		49
Referencias bibliográficas.....		50
Anexos.....		52

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1: Aportes de Cu Fino ('CUF') por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) iniciando con la "Fase Verde".....	32
Tabla 2: Aportes de Cu Fino ('CUF') por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) iniciando con la "Fase Azul"	32
Tabla 3: Aportes de flujos de caja ('CASH') por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) de ambos escenarios "Without Timing" y "With Timing".....	33
Tabla 4: Aportes de flujos de caja descontado ('CASH DISC') por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) de ambos escenarios "Without Timing" y "With Timing"	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Corrida 1, 2, 3, 4 bajo metodología Lerchs and Grossmann y algoritmo Lerchs and Grossmann.....	22
Figura 2: Un pequeño conjunto de conos y bancos	24
Figura 3: Vista conceptual en sección norte-sur de un tajo ilustrativo	25
Figura 4: Vista conceptual en sección norte-sur de un tajo ilustrativo	25
Figura 5: Lógica tradicional – Valor del dinero en el tiempo	26
Figura 6: Un ejemplo de vista de flujo de planificación integrad	27
Figura 7: Valor futuro del dinero.....	28
Figura 8: Formuación de restricciones a añadir al direccionamiento de minado.....	29
Figura 9: Mapa de flujo de trabajo en planificación minera	30
Figura 10: Mapa de flujo de trabajo en planificación minera.....	31
Figura 11: Gráfica de aportes de flujos de caja descontado.....	35
Figura 12: Gráfica de Aportes de Flujos de Caja Descontado Acumulado	36
Figura 13: Capacidades de mina y planta como variables en el Valor Presente Neto...	37
Figura 14: Línea de tiempo de verificación de hipótesis con aplicación en unidad minera Constancia.....	40
Figura 15: Vista en Planta de dos fases de minado	41
Figura 16: Vista en Planta de tres fases de minado.....	44
Figura 17: Variables influyentes en la medición de variación de Valor presente neto entre 2023 y 2024 para unidad minera Constancia	45
Figura 18: Tendencias de perfil de producción de Cobre por año para tres planes de minado.....	46
Figura 19: Resultados de incremento de valor Presente Neto en unidad minera Constancia	47

Introducción

La presente tesis aborda la optimización del Valor Presente Neto (VPN) de las reservas minables en la Unidad Minera Constancia, utilizando avanzadas técnicas de redireccionamiento de fases de minado. Este estudio surge de la necesidad de adaptar las prácticas mineras a los desafíos tanto operativos como financieros, enfocándose en la maximización de la rentabilidad del negocio minero a través de estrategias de planificación minera más eficaces y adaptadas a las capacidades operativas y limitaciones de la planta.

La investigación propone una metodología integrada que combina análisis geológico, financiero y operacional para reevaluar y optimizar las secuencias de minado. Se emplea algoritmos de optimización de pit que incluyen las restricciones de las mencionadas capacidades operativas de mina y planta para evaluar diferentes escenarios de minado, buscando mejorar la eficiencia operativa y el retorno económico.

Este enfoque pretende no solo responder a las necesidades internas de una compañía minera, sino también brindar valor agregado en su sostenibilidad tanto por el 'crosscheck' de validación de su producción de metal de interés en el mediano plazo (5 Años) como en sus reservas minables.

Además, el trabajo destaca la importancia de las decisiones de planificación en la viabilidad a largo plazo de las operaciones mineras, enfocándose en cómo las decisiones tomadas en la etapa de diseño pueden tener implicaciones significativas no solo en los resultados económicos, sino que además en la trazabilidad y viabilidad de un Plan LOM Operativo. La tesis se estructura alrededor del análisis de datos reales y aplicaciones prácticas, con el objetivo de ofrecer conclusiones y recomendaciones que sean de utilidad tanto para la academia como para la industria minera.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

U.M. Constancia pertenece a Hudbay Perú S.A.C. una empresa subsidiaria de la canadiense Hudbay Minerals Inc., que cuenta con más de 90 años de experiencia en la explotación y desarrollo de minas bajo políticas de “larga duración” y “bajo costo”. La compañía se ha establecido como un actor importante en la industria minera, no solo en Canadá sino también en Perú. La Unidad Minera Constancia, ubicada en la región de Cusco; es la operación minera sobre la cual realizaremos la aplicación de la investigación y análisis de resultados.

‘Constancia’ no solo es conocida por ser el noveno mayor productor de cobre en el Perú, sino que además decimos con orgullo ser un ejemplo de la aplicación de tecnologías avanzadas a la vanguardia de la ‘Minería 4.0’. Como empresa subsidiaria, Hudbay Perú se dedica a la extracción de Cobre y garantiza con una gestión social y ambientalmente responsable la sostenibilidad de las operaciones en Velille, Cuzco. En línea con este concepto, la empresa es bastante comprometida en el desarrollo de actividades que apuntan a minimizar su impacto ambiental. La empresa también ha mostrado un fuerte compromiso con el desarrollo comunitario, participando activamente en proyectos que benefician a las comunidades de Velille, Chumbivilcas, etc., zonas cercanas a sus operaciones.

En cuanto a la producción de metales en ‘Constancia’, Hudbay Perú se enfoca en la explotación de cobre como metal de interés principal en concentrado, cuyos productos secundarios son oro y plata; además, también produce concentrados de molibdeno.

En cuanto a la operación, ‘Constancia’ es una unidad minera que opera a la fecha dos tajos: Tajo Constancia y Tajo Pampacancha; sin embargo, es el Tajo Constancia el que durará a lo largo de la vida de la mina, mientras que el pequeño “tajo satélite” Pampacancha termina el minado de sus reservas en 2025.

Trabajando en Hudbay Perú S.A.C., me es posible asegurar que representamos un modelo de operación moderna y responsable, alineados con la excelencia y la 'Minería 4.0', y con un firme compromiso hacia la sostenibilidad y el desarrollo social. La presencia de Hudbay en Perú es un testimonio de su capacidad para adaptarse a diversos entornos geológicos, geográficos, sociales y regulatorios, manteniendo al mismo tiempo altos estándares de operación.

1.2 Descripción del problema de investigación

El subproceso de planificación al cual llamamos "Optimización de Pit" ha sido a lo largo de los años un proceso poco cuestionado para el nivel de implicancia que realmente tiene en el negocio minero. El direccionamiento de las fases de minado ha sido un factor crucial en el negocio minero desde que buscan la exposición de frentes de minado de mineral ('ore exposure' por su traducción al inglés) de mayor calidad posible en el menor tiempo posible y al menor costo posible, buscando así optimizar el Valor Presente Neto.

En un yacimiento, las múltiples (sino infinitas) combinaciones de ancho, largo, direccionamiento (azimut) y número de bancos en avance vertical por periodo sugieren un problema matemático de optimización con un nivel de complejidad 'no menor' si además incluimos sus restricciones geotécnicas. ¿Cómo encontrar la combinación óptima (léase perfecta e inmejorable, para ilustración) de todas estas variables geométricas para delimitar la primera fase de minado que cumpla el objetivo de maximizar el valor presente neto? ¿Y para delimitar la segunda fase? ¿Y para delimitar la tercera fase? Si acaso la tercera fase de minado está detrás de la primera, ¿cómo afirmar que mover la pared entre ambas unos 50 metros más hacia el Norte o 30 metros más hacia el Sur-Este no valdrá la pena? Todas estas preguntas son implicancias de la palabra "optimización" en el campo semántico y literal.

¿Cómo se puede identificar y aplicar la combinación óptima de todas las variables del Direccionamiento de Fases de Minado para maximizar el Valor Presente Neto (VPN) de la unidad minera de negocio en estudio?

Abordar lo planteado implica un análisis de las metodologías actuales y la exploración de herramientas de planificación minera en el mercado capaces de incorporar un mayor número de restricciones y variables en la delimitación de sus envolventes económicas 'guía' de fases de minado.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Maximizar el Valor Presente Neto de las Reservas Minables en la Unidad Minera Constancia mediante el redireccionamiento estratégico de sus fases de minado.

1.3.2 Objetivos específicos

Evaluar el impacto del redireccionamiento de las fases de minado sobre el Valor Presente Neto utilizando algoritmos emergentes que consideren un mayor número de restricciones.

Comparar los resultados del valor presente neto antes y después del redireccionamiento de fases de minado para determinar la eficacia de las estrategias implementadas.

Identificar las mejores prácticas y metodologías en el redireccionamiento de fases de minado que maximicen el valor presente.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Antecedentes internacionales

En el contexto internacional, la optimización en la planificación de minas ha sido un área de intensa investigación y desarrollo, destacándose en este campo investigaciones notables como las de Tolwinski, B., & Underwood, R. (2021), quienes han demostrado la importancia de incorporar tecnologías actualizadas y con foco exclusivo en la maximización de la rentabilidad, estudiando las metodologías de optimización del pit y diseño de fases de minado.

Tolwinski, B., & Underwood, R. (2021), nuevamente, han documentado cómo la implementación de software avanzado y algoritmos de optimización ha llevado a un

rediseño significativo en las estrategias de planificación y secuenciamiento de minado, mostrando mejoras sustanciales en el valor presente neto de los proyectos.

Investigaciones como las publicadas en journals internacionales de minería, donde se analizan las aplicaciones de técnicas como el Método de Lerchs-Grossmann o simulaciones de Monte Carlo o Secuenciamiento Directo de Bloques, ofrecen evidencia sobre los beneficios de estas metodologías en la optimización de los recursos y la reducción de costos.

1.4.2 Antecedentes nacionales

En el Perú, la optimización de pit y el direccionamiento de fases de minado como ejes del valor presente neto de un proyecto no han captado demasiada investigación. Los estudios en este ámbito han estado orientados a adaptar y mejorar las técnicas internacionales para ajustarlas a las condiciones y regulaciones locales.

Es importante considerar los desarrollos recientes en la industria minera peruana. Según un informe de BBVA Research (2023), se espera que 74 proyectos mineros se vuelvan operativos en 2023 con una inversión significativa, subrayando el continuo crecimiento y la importancia económica del sector en el país.

Los estudios realizados en el contexto nacional no solo se enfocan en la aplicación de técnicas existentes, sino también en la adaptación y desarrollo de nuevas metodologías extranjeras que consideren aspectos como la variabilidad de la estimación geológica, regulaciones ambientales, e la interacción con las comunidades.

Los antecedentes tanto internacionales como nacionales proporcionan un sólido fundamento para la investigación propuesta en esta tesis a desarrollar, destacando la relevancia y la necesidad de continuar explorando y mejorando las técnicas de planificación minera para maximizar la rentabilidad y sostenibilidad de los proyectos mineros.

Estos antecedentes no solo justifican la importancia del presente estudio, sino que también establecen un marco comparativo para evaluar la efectividad de las nuevas metodologías propuestas en investigación.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Entorno corporativo en la planificación minera

El entorno corporativo en el que se realiza la planificación de una mina es crucial para determinar las estrategias de negocio adecuadas. Este concepto ha sido explorado por autores como Brujil, G. H. T (2018), quien ha subrayado la importancia de las dinámicas del mercado y otros factores externos como la economía global y las tecnologías emergentes.

Análisis SWOT

El análisis SWOT es una herramienta fundamental que permite a las empresas identificar Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas de manera estructurada, lo cual es esencial para navegar en el complejo entorno minero.

- **Fortalezas:**

Identifica los recursos internos y capacidades que pueden ser aprovechados para obtener ventajas competitivas, como proyectos brownfield de expansión o acuerdos estratégicos con gobiernos locales.

- **Debilidades:**

Reconoce las limitaciones internas que pueden obstaculizar el alcance de objetivos, como la dependencia de recursos del yacimiento, la falta de innovación tecnológica, etc.

- **Oportunidades:**

Analiza los elementos externos que la empresa puede utilizar para su beneficio, como nuevos mercados emergentes, posibles colaboraciones con otras empresas, o cambios en la regulación que favorezcan la explotación minera sostenible.

- **Amenazas:**

- Evalúa los riesgos externos que podrían comprometer la seguridad y rentabilidad de las operaciones, como la fluctuación de los precios de los minerales, las políticas ambientales restrictivas o la inestabilidad política en regiones clave de operaciones.

Modelo de las Cinco Fuerzas de Porter

Brujil, G. H. T. (2018) proporciona un análisis detallado de cómo el modelo de Porter puede ayudar a entender el entorno competitivo en la minería. Este modelo analiza cinco fuerzas clave que determinan la intensidad competitiva y, por ende, la rentabilidad de un mercado.

- Rivalidad entre competidores existentes: En el sector minero, esta rivalidad se manifiesta en la competencia por recursos, mercados y posicionamiento tecnológico. Una alta rivalidad puede llevar a guerras de precios y aumento de costos operativos.
- Amenaza de nuevos entrantes: Las barreras de entrada en minería son generalmente altas debido a los grandes capitales requeridos y regulaciones estrictas. Sin embargo, la entrada de nuevos competidores con innovaciones tecnológicas o apoyo gubernamental podría alterar el equilibrio del mercado.
- Poder de negociación de los proveedores: Los proveedores de maquinaria, tecnología y materiales esenciales pueden influir significativamente en los costos de la minería. Su poder de negociación depende de su número y tamaño.
- Poder de negociación de los compradores: Los compradores de minerales y metales pueden ejercer presión sobre los precios, especialmente si compran en grandes volúmenes o si hay muchos vendedores en el mercado.
- Amenaza de productos o servicios sustitutos: En minería, los sustitutos pueden incluir materiales reciclados o tecnologías que reduzcan la dependencia de ciertos minerales. La viabilidad de estos sustitutos puede amenazar la posición de productos tradicionales.

2.1.2 Importancia del secuenciamiento

La secuencia en la que se extraen los bloques mineros y la secuenciamiento de estas actividades son críticas para el éxito operativo y financiero del proyecto.

Campos, P.H.A., Cabral, I.E., Ortiz, C.E.A., & Morales, N. (2018) resalta que la optimización de la secuencia de extracción es clave para maximizar el valor presente neto del proyecto, priorizando la extracción de bloques de alto valor en las etapas iniciales.

Fundamentos del secuenciamiento en minería

El secuenciamiento en la extracción minera se refiere al orden temporal y espacial en que se extraen los bloques mineros dentro de un yacimiento. Esta planificación no solo afecta la viabilidad técnica de las operaciones mineras, sino que también tiene un impacto directo en la rentabilidad financiera del proyecto.

- Optimización del valor: La secuencia de extracción está diseñada para maximizar el valor presente neto (VAN) del proyecto, priorizando la extracción de bloques de alto valor en las etapas iniciales para mejorar los flujos de caja y reducir el tiempo de retorno de la inversión.
- Gestión de riesgos: Una secuenciación efectiva ayuda a gestionar riesgos operativos y geológicos, como el acceso a bloques en zonas de alto riesgo de derrumbe o la gestión de recursos hídricos subterráneos.

Métodos de secuenciación y su impacto en el VAN

La metodología de secuenciación puede variar dependiendo de los objetivos del proyecto, las características del yacimiento y las condiciones del mercado.

- Secuenciación Basada en Grado: Prioriza la extracción de bloques con el mayor contenido mineral. Esta técnica puede aumentar el VAN al aprovechar los precios altos de los minerales, especialmente en mercados volátiles.
- Secuenciación Basada en Costos: Se enfoca en minimizar los costos operativos y de extracción, lo cual puede ser crucial en períodos de bajos precios de minerales o cuando los costos de producción son particularmente altos.

Herramientas y técnicas para la planificación de la secuenciación

El uso de software avanzado y técnicas de modelamiento y optimización es fundamental para simular diferentes escenarios de secuenciación y evaluar su impacto en el VPN del proyecto.

- **Modelamiento y optimización**

Herramientas como los sistemas de planificación minera (como Whittle, Vulcan o Datamine) permiten simular diversas estrategias de secuenciación y prever su efecto económico, ajustando dinámicamente las operaciones a las condiciones cambiantes del mercado.

- **Análisis de sensibilidad**

Se utiliza para evaluar cómo diferentes secuencias de extracción afectan la sensibilidad del proyecto a cambios en los precios de los minerales, los costos de producción y otros factores económicos externos.

Consideraciones estratégicas en el secuenciamiento

Adoptar un enfoque estratégico en la secuenciación requiere un balance entre factores técnicos, financieros y ambientales.

- **Sostenibilidad y responsabilidad social**

Considerar el impacto ambiental y social de las secuencias de extracción, buscando métodos que minimicen el daño ecológico y fomenten una relación positiva con las comunidades locales.

- **Flexibilidad operativa**

La capacidad para adaptar la secuencia de extracción a condiciones imprevistas es crucial para el éxito a largo plazo del proyecto. Esto incluye tener la flexibilidad para alterar la producción en respuesta a fluctuaciones del mercado o descubrimientos de nuevos recursos durante la vida del proyecto.

2.1.3 Planeamiento de minado a corto y largo plazo

Desarrollo de cronogramas que optimicen los flujos de caja y consideren las limitaciones operativas y de capital.

Integración de planificación y valorización económica

Amini, M., Allijani, F., & Mozaffari, Z. (2015) subraya la importancia de integrar planes operativos y financieros, utilizando técnicas de optimización como la programación lineal y modelos estocásticos para optimizar los recursos, maximizar los flujos de caja y garantizar la sustentabilidad operativa y financiera del proyecto.

- **Planeamiento a corto plazo**

Se enfoca en la planificación diaria, semanal y mensual de las actividades mineras. Este nivel de secuenciamiento es crucial para asegurar la eficiencia operativa, gestionar la mano de obra, el equipo y los suministros, y responder a las condiciones cambiantes del sitio.

- **Planeamiento a largo plazo**

Involucra la planificación anual y multianual, orientada a la estrategia general del proyecto. Su objetivo es alinear las operaciones mineras con los objetivos financieros y corporativos a largo plazo, considerando la exploración, expansión y cierres de áreas mineras.

Desarrollo de secuencias de minado optimizadas

Campos P.H.A, Arroyo, C.E., & Morales, N. (2018) argumentan que la generación de secuencias de minado optimizadas es esencial para balancear las necesidades operativas los objetivos financieros, adaptándose a las restricciones y oportunidades del mercado.

- **Técnicas de optimización**

Algoritmos como LINDO del Mine Plan Schedule Optimizer 'MPSO' de Minesight. Estas herramientas ayudan a secuenciar bajo restricciones de contaminantes, avance vertical por fases, número de equipos de carguío por fase, flota de camiones, etc.

- **Integración de planes operativos y financieros**

Los planes de minado deben integrar datos operativos detallados con proyecciones financieras, asegurando que todas las decisiones operativas contribuyan al éxito

financiero del proyecto. Es esencial en este punto la 'traducción' de las métricas del plan de minado en indicadores financieros de ingresos por ventas de mineral, así como costos operativos por minado de materia in situ y costos de inversión asociados por infraestructura mina.

Consideraciones clave en la planificación

La planificación efectiva debe considerar sendos factores críticos.

- **Flexibilidad y adaptabilidad:**

Los planes de minado deben ser flexibles para adaptarse a cambios imprevistos, como nuevas estimaciones geológicas, hallazgos de estructuras y/o fallas geotécnicas nuevas, fluctuaciones en los precios de los minerales; etc.

- **Sostenibilidad y responsabilidad ambiental:**

Es vital que los planes de minado consideren la gestión eficiente de recursos y el cumplimiento de normativas ambientales (EIA y Modificatorias).

- **Coordinación entre áreas de servicios técnicos:**

La coordinación efectiva entre Geología, Geotecnia, Operaciones, Mantenimiento y Costos y Planeamiento Financiero es esencial para implementar planes realistas y alcanzables, fomentando un ambiente colaborativo.

2.1.4 Evaluación económica de proyectos mineros

La evaluación económica proporciona la base para decisiones de inversión, evaluando la viabilidad y el potencial retorno de inversión de un proyecto minero.

Introducción al DCF en la evaluación de proyectos mineros:

El Análisis de Flujo de Caja Descontado (DCF) es una herramienta financiera esencial que permite evaluar la rentabilidad de un proyecto minero considerando el valor temporal del dinero. Es fundamental para determinar si los beneficios futuros de un proyecto justifican los costos e inversiones iniciales.

Este método calcula el Valor Actual Neto (VAN) de los flujos de caja proyectados de un proyecto minero, descontados a una tasa que refleja el riesgo y el costo de capital.

El VAN permite comparar la rentabilidad de diferentes opciones de inversión o proyectos mineros bajo consideración.

Importancia del DCF en planes de minado:

En el contexto de los planes de minado, el DCF se utiliza para optimizar la secuencia de minado y las fases de minado, asegurando que las decisiones tomadas maximicen el valor para los accionistas y minimicen los riesgos financieros.

- **Optimización de la secuencia de minado**

El DCF juega un rol crucial en la elección de las secuencias de minado, ayudando a determinar el orden y el tiempo óptimos para explotar diferentes zonas del yacimiento. La selección adecuada de las fases de minado puede significativamente impactar el VAN del proyecto, priorizando áreas de alto valor o reduciendo costos en las etapas tempranas.

- **Evaluación de fases de minado**

Cada fase de minado se evalúa individualmente y en conjunto con el plan general para determinar su contribución al flujo de caja y a la rentabilidad global del proyecto. Esto incluye análisis detallados de la inversión requerida, los costos operativos y los ingresos esperados de cada fase.

Metodología a aplicar el DCF en la evaluación de proyectos mineros

La aplicación del DCF en la minería requiere una serie de pasos metodológicos para asegurar precisión y relevancia en los resultados:

- **Proyección de flujos de caja**

Estimación de ingresos y costos basados en los planes de producción, precios de los minerales, costos operativos, y otras entradas económicas.

- **Selección de la tasa de descuento**

Determinación de una tasa adecuada que refleje el riesgo específico del proyecto, incluyendo factores como la ubicación geográfica, la estabilidad política, y la volatilidad del mercado de minerales.

- **Análisis sensibilidad y escenarios**

Realización de pruebas de sensibilidad y escenarios alternativos para entender cómo cambios en los supuestos clave pueden afectar el VAN, proporcionando una visión integral del riesgo financiero asociado al proyecto.

Por lo general, algunos corporativos suelen tener indicadores de IRR específicos como factor de decisión de inversión (por ejemplo, $IRR > 15\%$).

Resultados de un DCF

El análisis DCF es un componente crítico en la evaluación económica de proyectos mineros dentro de los planes de minado. Al aplicar este enfoque, los ingenieros de planeamiento mina pueden fundamentar decisiones estratégicas que no solo buscan la viabilidad financiera, sino también la sostenibilidad y eficiencia operativa a largo plazo.

Este enfoque asegura que los proyectos mineros se desarrollen de manera que maximicen el retorno de la inversión mientras gestionan efectivamente los riesgos y recursos.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Optimización de Pits

Es el término técnico en minería que recibe el proceso de generación de envolventes económicas en tajo abierto. Estas envolventes son llamadas “conos” debido a que no cuentan con diseño operativo, sino que son formas geométricas de tajos formadas por el conjunto de bloques que forman parte de la solución matemática realizada en función a restricciones geotécnicas y operativas. Según Campos, P. H. A., Cabral, I. E., Ortiz, C. E. A., & Morales, N. (2018), la optimización de pit es crucial para maximizar la rentabilidad de la mina, minimizando al mismo tiempo los costos y sin tomar en cuenta aún la inversión.

La optimización en la planificación de minas es esencial para maximizar la eficiencia y la rentabilidad. Las técnicas de optimización ayudan a determinar los diseños de fases más rentables y a secuenciar el minado de manera que se minimicen los costos y se maximicen los ingresos por ventas de mineral.

Modelos de bloques

El modelo de bloques es una representación tridimensional del yacimiento mineral. Campos, P.H.A., Arroyo, C.E., & Morales, N. (2018) destacan que cada bloque del modelo contiene información crucial como tipo y concentración de mineral, siendo fundamental para la evaluación económica de un proyecto minero y la planificación efectiva de la extracción de recursos.

- **Generación:**

Utilización de datos geológicos y de perforación diamantina para estimar la distribución del mineral y caracterización geológica como litologías, alteraciones, etc. A través de programas como Leapfrog (u otros) se realiza el modelamiento para convertir estas estimaciones en un modelo de bloques detallado y actualizado.

- **Importancia:**

Proporcionan la base para todas las decisiones de planificación, permitiendo simular diferentes escenarios de secuenciamiento de minado y optimizar el valor del proyecto.

Sectores y parámetros geotécnicos

En el diseño óptimo de un tajo, la integración de parámetros como BFA (Batter Face Angle) y IRA (Inter-Ramp Angle), junto con la correcta ubicación de rampas, es crucial para determinar el Overall Slope Angle (OSA). Tolwinski, B., & Underwood, R. (2021) explican que estos elementos son fundamentales para maximizar el alcance del mineral en el fondo del tajo y mantener la estabilidad de los taludes.

- **BFA (Batter Face Angle):**

Este ángulo de la cara del banco afecta directamente la estabilidad local de cada sección de talud.

- **IRA (Inter-Ramp Angle):**

Determina la estabilidad entre rampas y es crucial para el diseño global del tajo, ya que combina la accesibilidad de las rutas de acarreo con la estabilidad global del talud.

- **BERM:**

Actúa como una barrera de seguridad y una plataforma de descanso en el talud, esencial para la estabilidad global del mismo.

- **Distribución de rampas:**

Las rampas deben diseñarse y ubicarse de manera que complementen los ángulos de talud, facilitando el acceso y la operatividad sin comprometer la estabilidad.

La configuración óptima de BFA, IRA, y la disposición de las bermas, en conjunción con la planificación de rampas, permite diseñar un tajo con un OSA que equilibre la extracción de mineral y el volumen de desbroce.

El diseño detallado busca 'parar' el tajo lo más vertical posible dentro de los parámetros geotécnicos y la estabilidad de taludes, para reducir el desbroce en la zona alta y alcanzar más mineral en profundidad. Un OSA más vertical puede significar una reducción significativa en los costos de desbroce, lo que directamente afecta la rentabilidad del proyecto minero.

Utilizando software especializado, los ingenieros pueden simular diversos diseños de fases de minado para encontrar el equilibrio óptimo entre los parámetros geotécnicos y las necesidades operativas y económicas.

El diseño efectivo de un tajo utilizando estos parámetros requiere una alta comprensión de los parámetros geotécnicos y un análisis de riesgos. Los algoritmos tanto de optimización de pit como de diseño de fases de minado permiten a los planificadores experimentar con diferentes configuraciones y medir los impactos de cada cambio en el diseño.

Las envolventes económicas tomas este OSA como input actualizado para recalibrarse y con esto corroborar que cada zona de cada talud está alcanzando una zona mineralizada 'óptima' y pagando su desbroce asociado.

Técnicas de generación de envolventes económicas

Las técnicas avanzadas de optimización económica que cumplen con restricciones geotécnicas y geológicas son vitales. Campos, P.H.A., Arroyo, C.E., & Morales, N. (2018)

mencionan el uso de Análisis de Flujo de Redes y algoritmos de optimización son esenciales para optimizar el diseño del pit y el plan de minado, maximizando el valor presente neto (VPN) del proyecto.

- **Análisis de flujo de redes:**

Esta técnica implica el uso de algoritmos matemáticos para determinar el camino óptimo y el flujo a través de una red, que, en el caso de la minería, se aplica para optimizar el diseño del pit y la secuencia de minado. Se consideran diversos factores como los costos de extracción, los precios de los minerales y las restricciones operativas.

- **Método de Lerchs-Grossmann:**

Este es uno de los métodos más eficaces para la optimización de pits. Se basa en teoría de grafos para identificar el subconjunto de bloques que maximiza el valor presente neto (VPN) del proyecto, respetando a la vez restricciones geotécnicas y operativas. Este método garantiza que se seleccionen los bloques que ofrecen el mayor retorno económico bajo las restricciones impuestas.

- **Pseudoflow:**

Esta es una solución matemáticamente similar al Método de Lerchs-Grossman, con el valor agregado de una reducción significativa de tiempos.

- **Secuenciamiento directo de bloques:**

Conocido como DBS por sus siglas en inglés. Este método adiciona más restricciones, además de las geotécnicas y geológicas, pues incluye la capacidad de mina y planta en el momento de la generación de envolventes.

Aplicaciones del software en la optimización

El uso de software especializado en la optimización de pits (Whittle, Vulcan OP., Project Evaluator, Mining Math, etc.) es esencial para la planificación minera hoy. Estos programas permiten generar envolventes económicas bajo diferentes consideraciones, y exportar los resultados hacia programas que permiten visualizaciones en 3D, lo que permite realizar los diseños de fases.

2.2.2 Valorización de bloques

Antes de realizar una optimización de pit, primero debemos calcular los valores de cada bloque. El valor del bloque debe calcularse asumiendo que el bloque ya ha sido descubierto, de acuerdo a lo postulado por Pourrahimian, Y., & Ben-Awuah, E. (Eds.). (2020). En otras palabras, no se debe tener en cuenta el coste del minado de desmonte (costo base) necesario para acceder al bloque, porque eso es precisamente lo que calcula el algoritmo tradicional de optimización de pits. En particular, cualquier límite utilizado para definir el mineral debe reflejar el costo de procesamiento y cualquier costo adicional de extraer el bloque como mineral en lugar de como desmonte, pero no el costo de desmonte en sí.

El valor del bloque debe calcularse asumiendo que el bloque será minado. Por lo tanto, si el bloque contiene algo de mineral que podría procesarse de manera rentable, se debe agregar el valor del mineral, incluso si el valor total resultante del bloque sigue siendo negativo. El algoritmo no elegirá minar dicho bloque, pero si tiene que minarlo para obtener algo más valioso, el mineral ayudará a pagar la extracción, como lo haría en la práctica.

Cualquier gasto que se dejara de hacer si se detuviera el minado debe incluirse en el costo de minado de mineral, procesamiento o venta.

$$\text{VALOR}=(\text{METAL}*\text{RECUPERACIÓN}*\text{PRECIO}-\text{MINERAL}*\text{COSTP})-\text{ROCA}*\text{COSTM}$$

La parte entre paréntesis se repite para cada parcela de mineral explotable por separado en el bloque, y donde:

- **METAL:**
Unidades de producto en la parcela de mineral, es decir, toneladas de mineral multiplicadas por la ley.
- **RECUPERACIÓN:**
La proporción de producto recuperado al procesar el mineral.
- **PRECIO:**
El precio que se puede obtener por unidad de producto vendido.

- **ORE:**
Toneladas de mineral en la parcela de mineral.
- **COSTP:**
El costo EXTRA por tonelada de extraer el material como mineral y procesarlo, en lugar de tratarlo como desmonte.
- **ROCA:**
La cantidad total de roca (mineral y desmonte) en el bloque.
- **COSTM:**
El costo de extraer una tonelada de desmonte.

Valor de bloque si fuese mineral (BKVO)

Al tener la ecuación básica de ingresos menos costos, este valor estará regido:

$$BKVO = \text{Tonelaje} \times (\text{NSR} - \text{Costo G\&A} - \text{Costo de Procesamiento} - \text{Costo de Minado})$$

Valor de bloque si fuese desmonte (BKVW)

Considerando como cero los ingresos y los costos asociados al mineral, nos quedará solo el costo de minar el bloque y enviarlo al botadero.

$$BKVW = \text{Tonelaje} \times (0 - \text{Costo de Minado})$$

2.2.3 Evaluación de Riesgos y Costos

La aplicación de análisis de flujo de descuento y técnicas de Monte Carlo es esencial para evaluar los riesgos financieros y operativos. Amini, M., Allijani, F., & Mozaffari, Z. (2015) destacan que estas técnicas proporcionan una visión más amplia del riesgo y permiten una gestión de riesgos más efectiva.

Flujo de Descuento (Discounted Cash Flow, DCF)

El análisis de flujo de descuento es esencial para evaluar la viabilidad financiera de los proyectos mineros, ayudando a planificadores y a la gerencia a entender el valor presente de los flujos de efectivo futuros generados.

- **Valor Presente Neto (VPN):**

El VPN se calcula descontando los flujos de efectivo futuros al costo de capital del proyecto. Esto ayuda a determinar si el valor total de los ingresos futuros, una vez descontados, supera los costos iniciales y operativos.

- **Tasa de descuento:**

La selección de una tasa de descuento apropiada es crítica y generalmente refleja el riesgo asociado al proyecto. Factores como la estabilidad política del país, la volatilidad del mercado de minerales y los riesgos ambientales influyen en esta tasa.

- **Evaluación de escenarios:**

Diferentes escenarios de precios de minerales, costos operativos y posibles retrasos son evaluados para entender su impacto en el VPN, permitiendo a los gestores tomar decisiones más informadas.

Técnicas de Monte Carlo

Las técnicas de Monte Carlo son utilizadas para modelar la incertidumbre y los riesgos financieros y operativos de los proyectos mineros. Esta simulación permite a los planificadores ver todas las posibles consecuencias de sus decisiones y preparar estrategias para mitigar los riesgos.

- **Simulación de riesgos**

Al correr múltiples simulaciones, las técnicas de Monte Carlo proporcionan una distribución de los resultados posibles, ofreciendo una visión más amplia del riesgo y la incertidumbre que los métodos de análisis tradicionales.

- **Variables de entrada**

Variables como costos de producción, precios de minerales, y tasas de producción son introducidas como probabilidades, permitiendo que el modelo genere diferentes resultados basados en combinaciones de estas variables.

- **Optimización de decisiones**

Esta técnica ayuda a identificar las decisiones que maximizan el retorno ajustado al riesgo, guiando la asignación de recursos y la planificación temporal de las actividades.

Integración de las Técnicas en la Estrategia Minera

La integración efectiva de análisis de flujo de descuento en la estrategia minera es crucial para una planificación exitosa (Campos, P. H. A., Cabral, I. E., Ortiz, C. E. A., & Morales, N. (2018)).

- **Planificación basada en evidencia:**

La combinación de estas técnicas proporciona una base sólida para la toma de decisiones, permitiendo a los planificadores y gerentes evaluar diversas estrategias y sus impactos financieros antes de comprometer recursos significativos.

- **Gestión de riesgos:**

Permite una gestión proactiva de riesgos, donde los riesgos financieros y operativos son identificados y cuantificados, y las estrategias de mitigación son desarrolladas de manera sistemática.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general*

La implementación de estrategias de redireccionamiento de fases de minado, que incorporan restricciones de capacidad de mina y planta, mejora significativamente el Valor Presente Neto (VPN) de proyectos mineros, incrementando así su rentabilidad.

3.1.2 *Hipótesis específicas*

3.1.2.1 Hipótesis específica 1. El uso de algoritmos de optimización actualizados en la planificación de las fases de minado permite una mayor precisión en la proyección de la producción de metal contenido, lo cual se traduce en una gestión efectiva del flujo de caja ('cashflow') y los recursos financieros a mediano y largo plazo.

3.1.2.2 Hipótesis específica 2. El redireccionamiento estratégico de las fases de minado hacia zonas de alta ley, bajo consideraciones de las capacidades operativas actuales de mina y planta, sostiene o mejora los niveles de producción de cobre en el corto plazo, lo cual permite mitigar riesgos en las metas de producción de metal contenido de interés por factores ajenos a la planificación.

3.2 Estudiando el cálculo de envolventes económicas en tajo abierto

3.2.1 *Problemas distintos para yacimientos distintos*

La metodología de generación de envolventes económicas que busquen maximizar el valor presente neto del negocio está marcada por rutas críticas distintas en función a múltiples variables. Una de las variables más subestimadas es la naturaleza del yacimiento.

En yacimientos de alta variabilidad de leyes de cabeza (un Skarn, por ejemplo), la metodología de generación de "conos" está marcada por la ruta crítica de asegurar la extracción de la mayor concentración de mineral de alta ley con objetivos de maximización de recuperación minera (no metalúrgica, aún) de esa alta ley durante la extracción; pues conceptual y tácitamente un mineral de más alta ley pagará sus costos operativos y de

inversión asociados, y a más contenido mineralizado de alta ley alcanzado en la profundidad del tajo será mayor valor presente neto.

En este punto, la ley de corte dinámica juega un papel crucial y los problemas matemáticos de delimitación de fases empiezan a recalibrarse tanto por la política de ley de corte como por las alternativas de estrategia de negocio a implementar (incremento de tasas de procesamiento de mineral en pro de la maximización de contenido fino del metal de interés, por ejemplo).

En yacimientos de leyes de cabeza más regulares y uniformes con baja variabilidad (un Pórfido, por ejemplo), el problema matemático de generar envolventes económicas que maximicen el valor presente neto del negocio toma otro tipo de complejidad por múltiples factores, como la capacidad de mina óptima que permita aplicar (ahora flexiblemente) ley de corte dinámica sin exceder demasiado sus costos de minado.

En medio de la regularidad de leyes en el yacimiento, cada talud de la fase de minado delimitada es continuamente analizado: “¿el mineral bajo este talud paga su desbroce asociado?”, esto por unidades de metraje específicos en el tajo, o también “¿en cuántos periodos extraemos este mineral en comparación a los periodos de extracción de desmote?” son preguntas comunes que reflejan la competencia de ingresos y costos al delimitar las fases.

3.2.2 Entendiendo los algoritmos tradicionales (Lerchs and Grossmann)

Se podría preparar una serie de modelos de valor para una variedad de precios de productos. Los contornos obtenidos al pasarlos por un optimizador 3D formarían un conjunto de hoyos anidados.

Cuando realizamos una optimización 3D de Lerchs and Grossmann por un precio particular, se construye una estructura de árbol de escenarios, que no cambiará mucho si los valores de los bloques cambiaran en pequeñas cantidades.

De hecho, es posible ajustar el árbol para cualquier cambio en el valor del bloque ajustando los valores y eslabones de la cadena desde el bloque hasta la raíz de su rama, siempre que sigamos las reglas de Lerchs-Grossmann para la construcción de ramas. Es

posible que el árbol en su conjunto ya no sea óptimo porque los indicadores "para ser minado" pueden cambiar y se necesitarán más escaneos para solucionarlo, pero la computación requerida es menor de la que se requeriría si comenzáramos la segunda optimización desde cero.

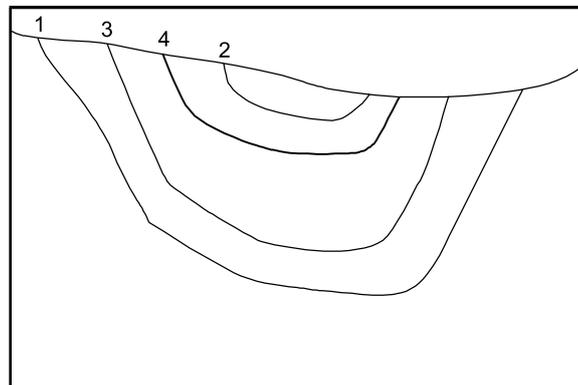
En este método se generan "conos" buscando que cada uno sea óptimo para uno de una lista de precios diferentes.

En el Lerchs and Grossmann optimizamos primero por un precio infinito. Esto generalmente se puede hacer en una pasada de los arcos de la estructura y luego podemos excluir todos los bloques fuera de este pit de mayor consideración. A continuación, optimizamos para obtener el precio más bajo especificado, lo que nos da el pit más pequeño y nos permite excluir todos los bloques que contiene de una mayor consideración.

Después de estas dos optimizaciones iniciales, se optimiza repetidamente por el precio que está en el medio de la lista de precios para la mayor cantidad de bloques indivisos (esto hasta que se hayan solucionado todos los precios). Para cada optimización, se considera solo aquellos bloques que se encuentran entre las capas para los precios más cercanos por encima y por debajo del precio objetivo para el cual existen las capas. Se ajusta los valores de estos bloques para permitir el nuevo precio y luego se escanea los arcos que se aplican a estos bloques hasta que no haya más cambios.

Figura 1

Corrida 1, 2, 3, 4 bajo metodología Lerchs and Grossmann y algoritmo Lerchs and Grossmann



Fuente: Curso corto de "Strategic Mine Planning" de Whittle.

Con este enfoque, cada optimización se realiza en cada vez menos bloques e implica cada vez menos ajustes al árbol de Lerchs-Grossmann. Tener en cuenta también que, dado que ningún vínculo en el árbol cruza un pit existente, los vínculos tienden a volverse cada vez más paralelos a los depósitos cercanos y, por lo tanto, son cada vez más fáciles de optimizar.

La combinación de estos efectos hace que las sucesivas optimizaciones sean cada vez más rápidas. En la práctica, se pueden generar 100 pits en aproximadamente el tiempo que llevaría realizar unas cinco optimizaciones simples.

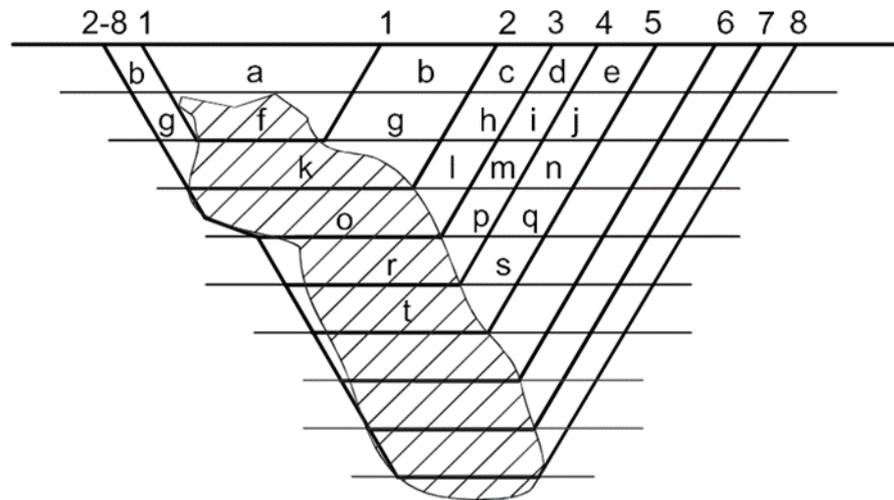
Tener en cuenta que, dado que se trata con bloques de tamaño finito, bajo esta metodología es completamente posible que uno o más precios adyacentes produzcan exactamente el mismo contorno del pit. De hecho, esto sí sucede y con frecuencia, y el resultado es que se generan menos “conos” de los que sugeriría la lista de precios ofrecidos.

Lo importante a tener en cuenta es que cada “cono” obedece a las restricciones de pendiente requeridas, valores económicos de valorización de bloques, precios (artificio de conocido revenue factor, etc.), pero en ninguna parte se considera la temporalidad.

La siguiente figura es un esquema de un pequeño conjunto de bancos y estructuras de tajo. En la práctica, lo habitual es producir de cincuenta a cien proyectiles, por lo que quedan mucho más cerca de lo indicado aquí. Sin embargo, se aplican los mismos principios.

Figura 2

Un pequeño conjunto de conos y bancos



Fuente: Curso corto de "Strategic Mine Planning" de Whittle.

Las secuencias en las que se puede explotar cualquiera de los ocho pits sin romper las restricciones de la pendiente están claramente definidas. Por ejemplo, debemos extraer "a" antes de extraer "f". Debemos extraer "a", "f", "b" y "g" antes de extraer "k".

Dado que conocemos todos los detalles de los bloques reales que se encuentran en cada intersección de banco, podemos aplicar límites y calcular toneladas, leyes y flujos de efectivo para cada una de esas intersecciones. Por lo tanto, si especificamos una secuencia particular en la que vamos a explotar las intersecciones, el algoritmo puede calcular un cronograma de vida útil de la mina con toneladas completas, leyes, flujos de efectivo y flujos de efectivo descontados de acuerdo con los límites de rendimiento especificados por el usuario. Esta estimación resulta en el Plan LOM Estratégico.

3.2.3 Ilustrando la lógica tradicional

Ilustremos generando dos "fases de minado" en la siguiente figura. Para efectos de ilustración, zonificando cada uno de las fases en función a si es desmonte, baja ley o alta ley

Figura 3

Vista conceptual en sección norte-sur de un tajo ilustrativo



Fuente: Elaboración propia.

Ahora asignémosle una valorización simbólica en unidades millones de dólares (M\$).

Figura 4

Vista conceptual en sección norte-sur de un tajo ilustrativo.



Fuente: Elaboración propia.

En nuestra ilustración, a cada zona de desmonte se le ha asignado un valor de -5 M\$, a cada zona de baja ley +20 M\$ y cada zona de alta ley +35 M\$.

La suma de zonas dentro de la "Fase Norte" o "Fase Verde" es de

$$-50+200+200+200+200 = +750 \text{ M\$ (RF 0.25)}$$

La suma de zonas dentro de la “Fase Sur” o “Fase Azul” es de

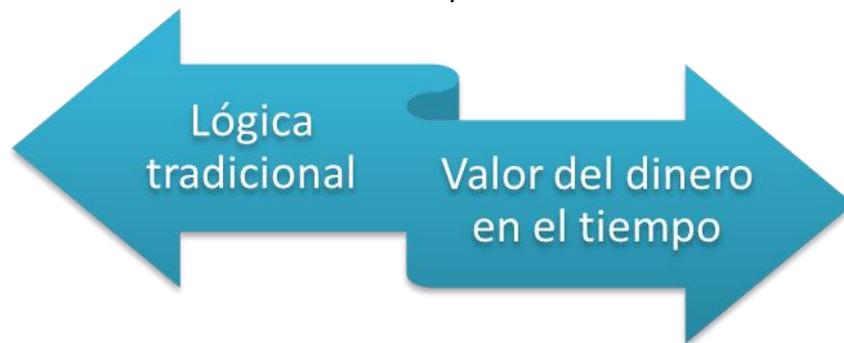
$$-50-50+350+350 = +600 \text{ M\$ (RF 0.40)}$$

Este enfoque nos llevaría por naturaleza lógica a sugerir que entremos a minar la fase de minado localizada en el talud norte, pues tiene un mayor valor total (750 > 600 M\$).

Sin embargo, aquí aún no entra a tallar un concepto crucial y ya descrito en el marco teórico: el tiempo y el valor del dinero en el tiempo.

Figura 5

Lógica tradicional – Valor del dinero en el tiempo



Fuente: Elaboración propia.

La lógica tradicional nos sugiere que vayamos por la “Fase Verde” o “Fase Norte” por tener un mayor valor total dentro de su volumen, a esto es posible llamarlo “valor stand-alone” de la fase, es decir, cuánto valdría si el problema consistiera en optimizar su volumen.

La secuencia de minado consiste, sin embargo, en maximizar el valor del plan de minado en conjunto, considerando la interacción entre fases y el valor del dinero en el tiempo. ¿Qué pasaría si la “Fase Verde” no se puede sacar en un solo periodo? ¿Qué pasaría si la “Fase Verde” podría ser minada en 4 periodos mientras que la “Fase Azul” solo en 2 o 3? ¿Seguiría siendo la “Fase Verde” de mayor valor que la “Fase Azul”?

3.2.4 Sesgo de algunos algoritmos de optimización de pit

El sesgo de secuenciar el minado a partir de fases delimitadas “por algún algoritmo de optimización aceptado mundialmente” ha llevado a los ingenieros de planificación de minado a no cuestionar mucho lo que ya teóricamente es ‘óptimo’. El sesgo se ha extendido aún más al suponer que el no entender la matemática del algoritmo es sinónimo de no

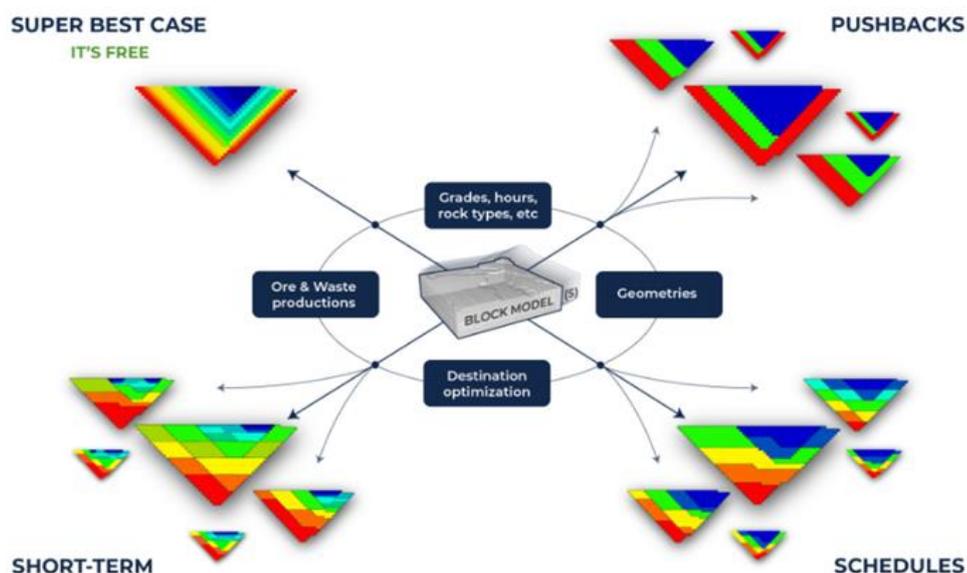
entender el funcionamiento del mismo. Es entonces aquí cuando las envolventes económicas que son guía de las fases de minado se convierten en un nicho con mucho campo de investigación pendiente por realizar.

¿Cómo un ingeniero de minas sin ser matemático puro puede administrar las actuales herramientas del mercado para buscar mejoras en el cálculo de envolventes económicas? ¿Qué tanta oportunidad tenemos al entender el funcionamiento del algoritmo? Y después de entenderlo, entonces tener la capacidad de responder a la pregunta ¿existen algoritmos con mejores resultados? Todo esto de forma conceptual aún, sin matemática.

Las herramientas actuales en el mercado han ido evolucionando en los últimos años, y hoy existen algoritmos que, si bien están aún lejos de ser perfectos, son mejores que los de ayer al considerar un mayor número de restricciones en el proceso de delimitación de envolventes económicas. A mayor número de restricciones consideradas (como la restricción de capacidad de planta y de mina), más cerca del valor óptimo estará nuestro resultado computacional de envolventes económicas y, por ende, de negocio minero.

Figura 6

Un ejemplo de vista de flujo de planificación integrado.



Fuente: Web de Mining Math.

3.3 Inclusión de la temporalidad como input de cálculo de envolventes

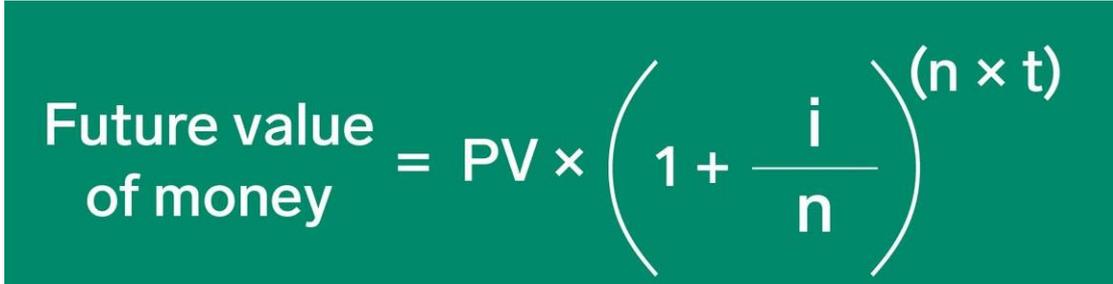
3.3.1 Variables de restricción en el tiempo

Hablar de tiempo es el resultado de tener recursos limitados para la extracción del mineral. Las operaciones mineras son limitadas no solo en las reservas minables del yacimiento, o en sus recursos minerales totales, sino además en su infraestructura y equipos mina para llevar a cabo la extracción. Si se tuviese infraestructura y equipos ilimitados, utópicamente minaríamos y procesaríamos todo en un solo periodo. La planta tiene una capacidad de procesamiento limitada medida en toneladas por día, la mina cuenta con equipos con una productividad determinada en toneladas por hora, los camiones tienen tolvas con una capacidad determinada en toneladas por ciclo de acarreo, etc.

El valor del dinero en el tiempo es un factor crucial en este punto. Los primeros periodos tienen una menor tasa de descuento que sus periodos posteriores, y en esta línea, nos sugiere que deberemos maximizar los flujos de caja en los primeros años para lograr maximizar el valor presente del proyecto.

Figura 7

Valor futuro del dinero


$$\text{Future value of money} = PV \times \left(1 + \frac{i}{n}\right)^{(n \times t)}$$

Fuente: Fórmula de aceptación mundial.

En esta línea, es relevante considerar que la capacidad de mina y la capacidad de planta serán factores determinantes para bosquejar la temporalidad de la extracción de mineral desde las envolventes económicas a un nivel estratégico aún.

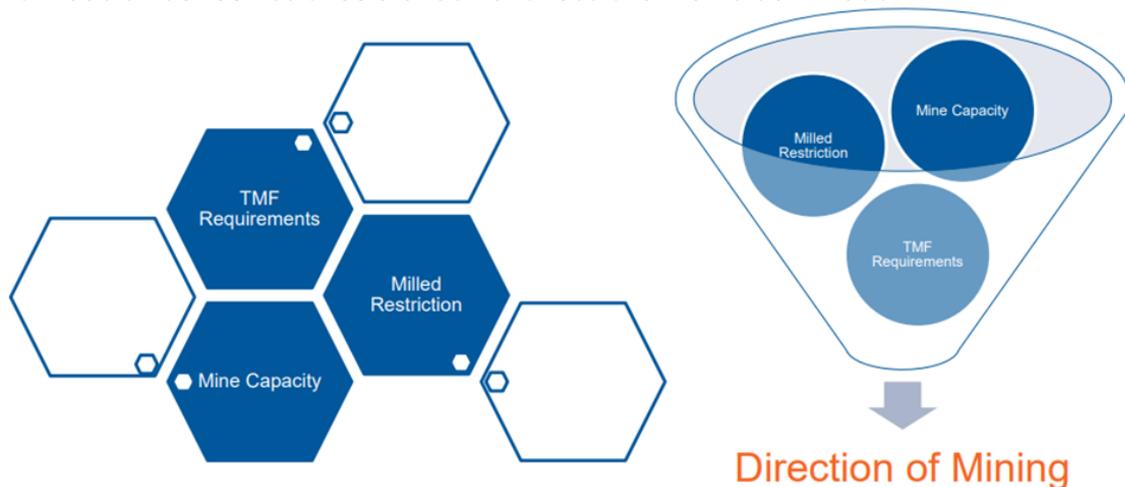
3.3.2 Capacidad de mina y capacidad de planta

La secuencia de extracción es delimitada por la capacidad de planta y la capacidad de mina, pues nos establecen cuánto mineral podemos procesar y cuánto tonelaje podemos minar y mover en un periodo determinado (en este caso, por años).

La capacidad de la mina y la planta define el tamaño y la forma de las fases de minado. No pueden ser arbitrariamente grandes o pequeñas; deben estar en línea con lo que la infraestructura puede manejar eficientemente cada año, tanto en términos de extracción (total de tonelaje de desmonte más mineral) como de procesamiento (tonelaje de mineral). Esto asegura que la planificación de la mina esté alineada con las capacidades operativas, maximizando la eficiencia y la rentabilidad del proyecto minero.

Figura 8

Formulación de restricciones a añadir al direccionamiento de minado.



Fuente: Elaboración propia.

La hipótesis general de la presente tesis es que “delimitar y direccionar las fases de minado con envolventes económicas generadas bajo un mayor número de restricciones (incluyendo capacidad de mina y planta) incrementará significativamente el Valor Presente Neto del proyecto como unidad de negocio.”.

¿Cómo entonces no incluir la variable de temporalidad en la generación de envolventes económicas? ¿Por qué incluirla en el secuenciamiento de minado (etapa posterior) y no desde la generación de “conos”?

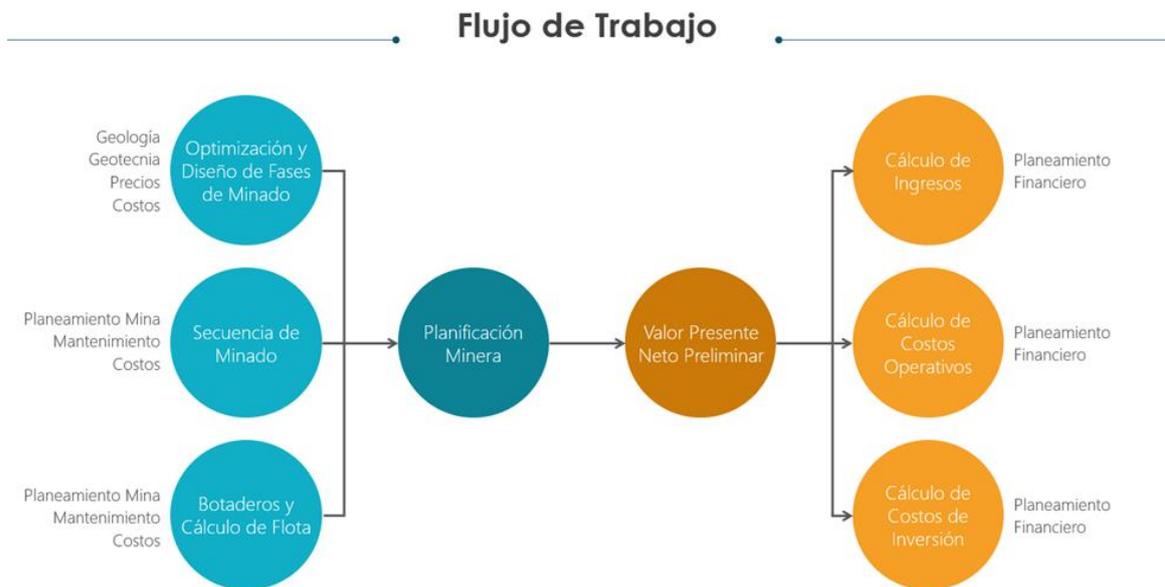
3.3.3 Impacto en el Flujo de Planificación Minera

El flujo de trabajo en la planificación minera empieza con la Optimización y Diseño de Fases de Minado, considerando información clave de geología, geotecnia, precios y costos para diseñar las fases óptimas de extracción. Posteriormente, la Secuencia de Minado detalla el orden y el tiempo de extracción, que alimenta directamente a la Planificación Minera, estableciendo cómo se procederá día a día en la mina.

El Valor Presente Neto Preliminar se calcula para evaluar la rentabilidad del proyecto, integrando los flujos proyectados de ingresos y costos operativos, así como los costos de inversión necesarios para la implementación del proyecto. Cada paso se retroalimenta al Planeamiento Financiero, asegurando que la estrategia financiera esté alineada con las operaciones mineras y los objetivos económicos generales. Este proceso integrado ayuda a optimizar la eficiencia y la rentabilidad del proyecto minero.

Figura 9

Mapa de flujo de trabajo en planificación minera.



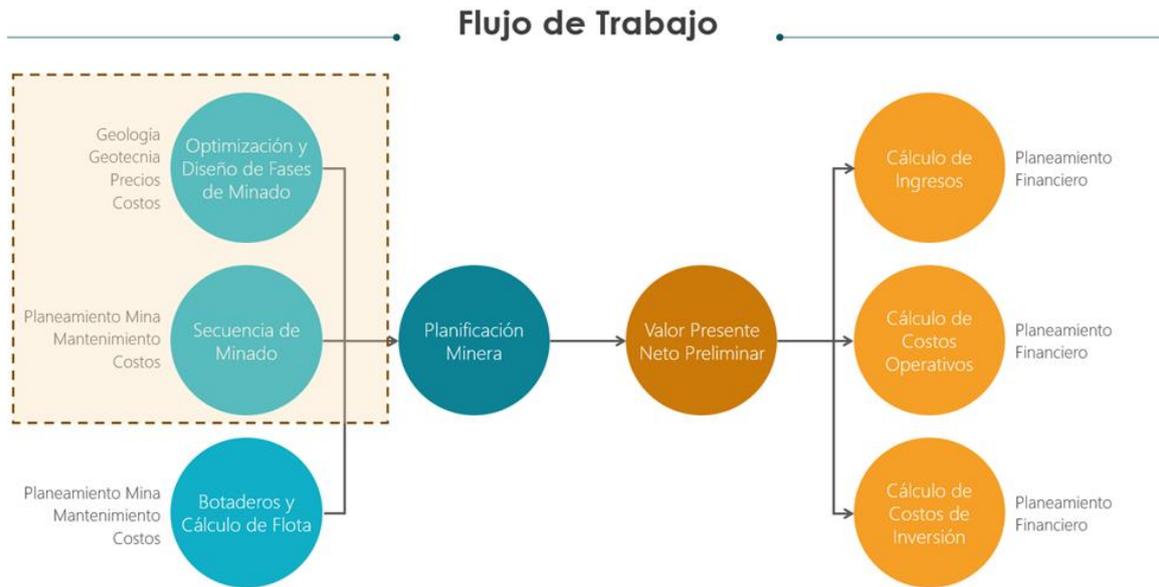
Fuente: Elaboración propia.

En el flujo de trabajo de planificación minera, la incorporación de la temporalidad se centra en la fase de Optimización y Diseño de Fases de Minado. Aquí, las capacidades de mina y de planta se utilizan como variables de entrada para generar envolventes económicas que dictan la secuenciación del minado. Estas capacidades determinan la

cantidad máxima de material que puede ser extraído y procesado en un periodo dado, influyendo directamente en el diseño de las fases de minado para asegurar la viabilidad y eficiencia operativa.

Figura 10

Mapa de flujo de trabajo en planificación minera.



Fuente: Elaboración propia.

La evaluación del Valor Presente Neto Preliminar se realiza después, utilizando los datos generados en la fase anterior; sin embargo, el cálculo del VPN se ajusta basado en la secuenciación y las capacidades operativas, donde las restricciones de tiempo son críticas. Este valor ayuda a determinar la rentabilidad del proyecto bajo las condiciones operativas y limitaciones de tiempo establecidas, permitiendo ajustes financieros basados en los flujos de efectivo esperados y descontados.

3.3.4 Ejemplificación

Volvamos al ejemplo anterior de las fases “Norte” y “Sur” (en adelante, “Fase Verde” y “Fase Azul”). En el ejemplo anterior, la metodología tradicional sugiere que la “Fase Verde” debe extraerse primero al tener mayor valor total unitario stand-alone (como respuesta a un determinado precio y revenue factor).

Cuando generamos envolventes económicas con algoritmos que incluyen las restricciones de temporalidad (capacidad de mina y capacidad de planta), la respuesta es que la “Fase Azul” debería extraerse primero a pesar de su menor valor total stand-alone.

Tenemos entonces dos escenarios, a los cuales llamaremos:

- Escenario “Without Timing”: “Fase Verde” primero y “Fase Azul” después
- Escenario “With Timing”: “Fase Azul” primero y “Fase Verde” después.

Analizaremos, entonces, su secuencia de minado con una capacidad de planta limitada. Veamos el perfil de producción de cobre fino por fase y por año.

Tabla 1

Aportes de Cu Fino (‘CUF’) por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) iniciando con la “Fase Verde”.

PERÍODO	FASE NORTE	FASE SUR - OESTE	FASE SUR - ESTE	TOTAL CUF
Año 3	72,000	0		72,000
Año 4	45,000	32,000		77,000
Año 5	55,000	30,000	5,000	90,000
Año 6	33,000	61,651	25,000	119,651
Año 7	49		21,587	21,635
TOTAL	205,049	123,651	51,587	380,286

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Aportes de Cu Fino (‘CUF’) por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) iniciando con la “Fase Azul”

PERÍODO	FASE SUR-OESTE	FASE SUR - ESTE	FASE NORTE	TOTAL CUF
Año 3	90,000	5,000		95,000
Año 4	33,651	35,000	27,000	95,651
Año 5		11,587	74,000	85,587
Año 6			74,000	74,000
Año 7			30,049	30,049
TOTAL	123,651	51,587	205,049	380,286

Fuente: Elaboración propia.

Los datos presentados ilustran el perfil de extracción de cobre fino por año bajo dos secuencias de minado diferentes. En el primer escenario, priorizando la Fase Verde, el total acumulado de cobre fino extraído es de 380,286 toneladas, con la Fase Verde contribuyendo 205,049 toneladas. Este enfoque muestra una producción significativa en

los primeros años de esta Fase Verde, especialmente en el Año 3 y disminuyendo gradualmente hacia el Año 7.

En el segundo escenario, donde la Fase Azul es priorizada, la producción total también suma 380,286 toneladas de cobre fino, indicando que aunque la secuencia de las fases varía, el total acumulado permanece constante. Sin embargo, la distribución anual cambia, mostrando una total mayor en los primeros años, y potencialmente facilitando una operación más sostenida y un flujo de ingresos más estable año tras año.

Ambos escenarios culminan en la misma producción total de cobre fino, pero las diferencias en la secuencia de fases alteran la distribución de la producción por año, impactando directamente el flujo de caja (sin descontar aún) anual.

Ahora veamos los flujos de caja de ambos escenarios (ingresos por venta de cobre menos costos operativos menos costos de inversión) sin considerar aún el valor del dinero en el tiempo.

Tabla 3

Aportes de flujos de caja ('CASH') por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) de ambos escenarios "Without Timing" y "With Timing".

Período	FASE NORTE	FASE OESTE	FASE SUR-ESTE	CASH
Año 3	\$ 246	\$ -	\$ -	\$ 246
Año 4	\$ 154	\$ 78	\$ -	\$ 231
Año 5	\$ 188	\$ 73	\$ 29	\$ 290
Año 6	\$ 113	\$ 150	\$ 145	\$ 408
Año 7	\$ 0	\$ -	\$ 146	\$ 126
TOTAL	\$ 700	\$ 300	\$ 300	\$ 1,300

Período	FASE OESTE	FASE SUR-ESTE	FASE NORTE	CASH
Año 3	\$ 218	\$ 29	\$ -	\$ 247
Año 4	\$ 82	\$ 204	\$ 92	\$ 377
Año 5	\$ -	\$ 67	\$ 253	\$ 320
Año 6	\$ -	\$ -	\$ 253	\$ 253
Año 7	\$ -	\$ -	\$ 103	\$ 103
TOTAL	\$ 300	\$ 300	\$ 700	\$ 1,300

Fuente: Elaboración propia.

Sin considerar aún el valor del dinero en el tiempo, en el ejemplo se muestra que el aporte de flujo de caja “CASH” en total es el mismo en total 1,300 M\$, pues no solo se ha producido la misma cantidad de cobre fino, sino que además han sido las mismas toneladas minadas y molidas (capacidad de mina y planta son similares).

En el primer ejemplo de Flujos de Caja iniciando el minado por la “Fase Verde”, los flujos de caja son 246, 231, 290, 408 y 126 M\$ en los Años 3, 4, 5, 6 y 7.

En el segundo ejemplo de Flujos de Caja iniciando el minado por la “Fase Azul”, los flujos de caja son 247, 377, 320, 253 y 103 M\$ en los Años 3, 4, 5, 6 y 7.

Ahora veamos los flujos de caja de ambas fases tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo, y asignando un factor de descuento en el tiempo en función al número de Año en el que se mina cada zona de cada fase.

Tabla 4

Aportes de flujos de caja descontado (“CASH DISC”) por fase de minado (en función a su contenido mineralizado por zona) de ambos escenarios “Without Timing” y “With Timing”.

Período	CASH	Time Factor	CASH DISC	CUMULATIVE
Año 3	\$ 246	0.7938	\$ 195	\$ 195
Año 4	\$ 231	0.7350	\$ 170	\$ 365
Año 5	\$ 290	0.6806	\$ 197	\$ 562
Año 6	\$ 408	0.6302	\$ 257	\$ 819
Año 7	\$ 126	0.5835	\$ 73	\$ 892
TOTAL	\$ 1,300		\$ 892	Menos VPN !!

Período	CASH	Time Factor	CASH DISC	CUMULATIVE
Año 3	\$ 247	0.7938	\$ 196	\$ 196
Año 4	\$ 377	0.7350	\$ 277	\$ 474
Año 5	\$ 320	0.6806	\$ 218	\$ 692
Año 6	\$ 253	0.6302	\$ 159	\$ 851
Año 7	\$ 103	0.5835	\$ 60	\$ 911
TOTAL	\$ 1,300		\$ 911	Más VPN !!

Fuente: Elaboración propia.

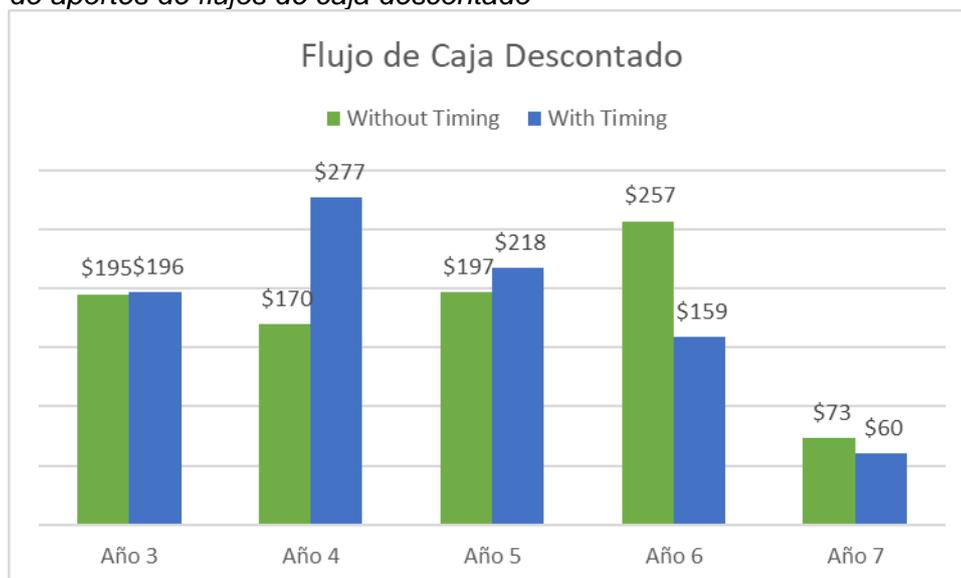
Aunque la Fase Verde (o Norte) en el primer escenario muestra un valor total más alto (750 vs 600 M\$), el VPN es menor comparado con el segundo escenario, donde la Fase Sur, a pesar de su valor total inicial más bajo, genera un VPN más alto debido a su secuencia de minado más favorable en cuanto al valor del dinero en el tiempo refiere.

Ahora plotearemos los flujos de caja descontados (a causa del valor del dinero en el tiempo) en diagramas ilustrativos para enfocar el impacto de la secuencia de minado en el valor presente neto.

Los gráficos presentados muestran la comparación de dos escenarios de secuenciación de minado: uno sin considerar la temporalidad ("Without Timing") y otro considerándola ("With Timing"). Los colores a usar son verde y azul en alusión a qué fase se mina primero (la "Fase Verde" o la "Fase Azul").

Figura 11

Gráfica de aportes de flujos de caja descontado

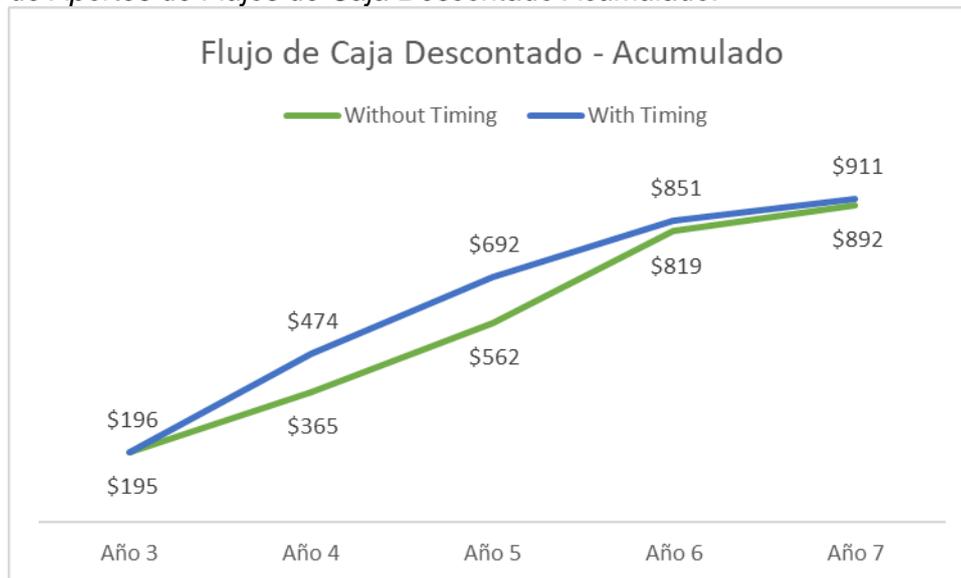


Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico, las barras verdes representan el flujo de caja descontado año a año sin tener en cuenta las restricciones temporales, mientras que las barras azules reflejan el flujo con esas restricciones incorporadas. Observamos que el escenario "With Timing" tiende a mejorar los flujos de caja en los años intermedios del proyecto, indicando que la consideración de la capacidad de mina y planta en la generación de los "conos" guía de fases de minado sí influye en la maximización del valor presente neto (VPN).

Figura 12

Gráfica de Aportes de Flujos de Caja Descuento Acumulado.



Fuente: Elaboración propia.

El este gráfico se muestra la acumulación del flujo de caja descontado a lo largo del tiempo. Aquí, la línea azul (con temporalidad) supera a la verde hacia los años finales del proyecto, demostrando que la consideración de las restricciones de temporalidad (capacidad de mina y capacidad de planta) puede resultar en un mayor retorno total ajustado al valor del tiempo, pese a que en primera instancia el escenario verde entraba a minar la fase de mayor valor stand-alone (750 M\$).

Esto sugiere que la planificación que incorpora la temporalidad no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también optimiza el retorno financiero a lo largo del proyecto.

Esto ilustra cómo las decisiones de secuenciación pueden influir en la rentabilidad a largo plazo más allá del valor monetario inmediato.

3.4 Tendencias y visualización al futuro

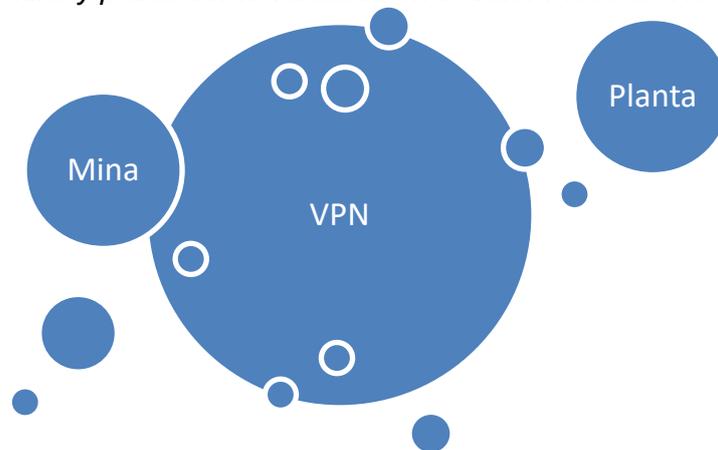
La incorporación de restricciones de mina y planta durante la generación de envolventes económicas es un paso crítico hacia la mejora del Valor Presente Neto (VPN) de un proyecto minero, marcando una tendencia hacia la optimización integral de variables operacionales y financieras. Esta práctica no solo alinea la capacidad de producción y procesamiento con las proyecciones financieras, sino que también reduce

significativamente el riesgo de sobreestimación de los recursos y la capacidad operativa, llevando a una evaluación más precisa y sostenible de los proyectos mineros.

En el futuro, se espera el desarrollo de herramientas avanzadas de simulación y modelamiento que integren todas las variables relevantes en la planificación minera de manera simultánea y no solo por etapas. Este enfoque permitirá a los ingenieros y planificadores mineros evaluar el impacto combinado de múltiples factores, como la geología, los precios del mercado, la tecnología disponible, los costos operativos, y las restricciones ambientales y regulatorias, en tiempo real y con gran precisión.

Figura 13

Capacidades de mina y planta como variables en el Valor Presente Neto.



Fuente: Elaboración propia.

Estas herramientas emplearán algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para predecir y optimizar el flujo de trabajo en la planificación minera, facilitando la toma de decisiones estratégicas y operativas. Esto no solo maximizará el VPN, sino que también mejorará la sostenibilidad de las operaciones mineras al adaptar las prácticas de extracción a los cambios dinámicos en el mercado y en el entorno operativo. Con estas capacidades, el sector minero puede anticiparse a futuros desafíos y oportunidades, adaptándose proactivamente para mantener la viabilidad y rentabilidad a largo plazo.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Disclaimers en la exposición de resultados

4.1.1 *Comentarios a la confidencialidad de data*

La gestión de la confidencialidad de datos en la investigación asociada a la Unidad Minera Constanza se ha llevado a cabo con el máximo rigor. Los protocolos establecidos garantizan que toda información sensible, incluyendo datos operativos y estratégicos, esté adecuadamente protegida contra cualquier forma de divulgación no autorizada. Se han utilizado métodos de cifrado y anonimización para asegurar que los datos críticos no sean reconocibles fuera del contexto de análisis específico de esta investigación. Además, se ha mantenido una constante revisión de las políticas de confidencialidad para adaptarse a cualquier cambio en las regulaciones legales o en las exigencias corporativas, asegurando así que la manipulación de datos cumpla con todas las normas vigentes sobre protección de información. Esta práctica no solo protege la información propia de la mina, sino que también resguarda la integridad y la confianza en los procesos de investigación, haciendo posible la investigación de data sin comprometer la seguridad o los intereses de la compañía.

4.1.2 *Alteración de números*

Para cumplir con los compromisos éticos y las políticas de confidencialidad de la empresa, se ha procedido a la alteración sistemática de los números presentados en los resultados de esta tesis. Esta modificación se ha diseñado para mantener el equilibrio entre la protección de datos sensibles y la necesidad de proporcionar una visión clara y educativa del análisis realizado. Los métodos de alteración incluyen la modificación de escalas, la agregación de datos, y el uso de coeficientes de ajuste para desviar los valores exactos sin distorsionar las tendencias y patrones fundamentales observados. Este enfoque permite demostrar la validez de los modelos y teorías propuestas, apoyando las conclusiones de la investigación con datos que, aunque modificados, reflejan fielmente las dinámicas y los fenómenos estudiados. Además, se ha establecido un proceso de revisión

y validación por parte de expertos independientes para asegurar que las modificaciones no afecten la calidad ni la precisión del análisis científico, manteniendo un equilibrio entre la integridad académica y la protección de la información confidencial.

4.2 Aplicación en envoltentes económicas de U.M. Constanca

Durante el proceso de planificación minera anual para elaborar el plan de vida de mina (en adelante, Plan LOM, por sus siglas en inglés), se tenía cierta incertidumbre en algunas características de Plan LOM anterior, pues se tuvo sendos hallazgos con una latente oportunidad de mejora:

- Elevado tonelaje de envío a stocks en 2025-2029.
- Fases de minado muy grandes localizadas en el talud norte del tajo Constanca debido a su alta cota (superior en 150-200 metros de altitud con respecto a su talud sur).
- Talud Norte siendo minado primero a pesar de su baja ley de cabeza de Cobre en comparación a otras zonas del tajo.
- Elevado Stripping (relación desmonte/mineral) para la expansión de reservas dentro de la forma geométrica potencial analizada.
- Falta de mapeo del cálculo del deferred Stripping como una reducción de OPEX por capitalización de inicios de fase de minado (no se tomaba en cuenta que “minar desmonte era más barato que incluso su costo de minado preliminar”)

Bajo este contexto, surgía meritorio el cuestionar que en una zona de baja y mediana ley se destinen los recursos de flota de equipos para el minado y el avance de la operación. Se estaba usando la capacidad de mina para minar zonas de baja y mediana ley, y además en fases grandes para la operación y la flota de equipos con la que se contaba.

En un horizonte a largo plazo, surgía retador lograr el incremento de reservas potencial esperado por el corporativo, pues la fase de expansión de reservas Minables se localizaba en una zona colindante con la principal falla geológica regional (Falla Yanak). Esto incrementaba considerablemente el desmonte requerido, pues la estabilidad

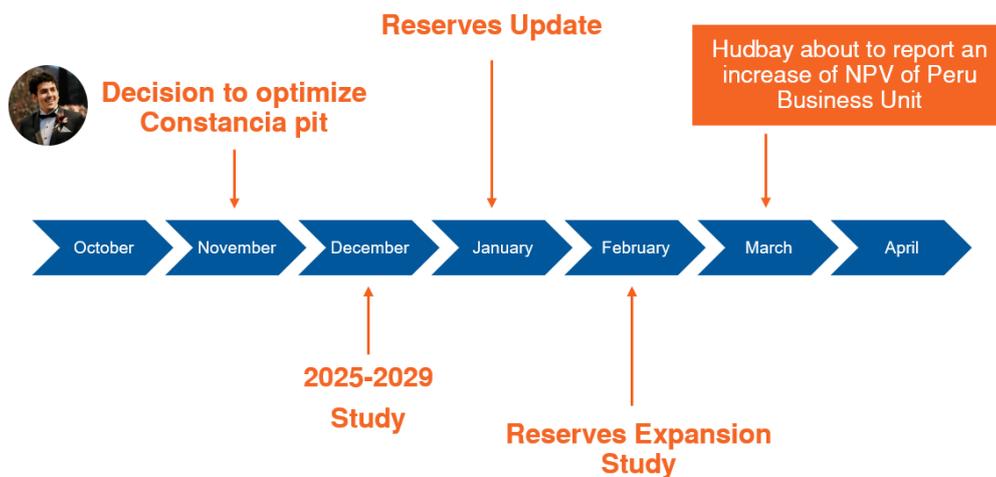
geotécnica era dependiente de taludes con un menor ángulo inter-rampa (IRA) y, por ende, más “echados”.

Todas estas realidades del Plan LOM anterior nos sugerían un enfoque centrado en el estudio de las metodologías de planificación, con el fin de formularlas y acoplarlas en función a dos objetivos: optimizar el Plan de 5 Años (5Y Mine Plan, por su traducción al inglés) y dar viabilidad económica a la expansión de Reservas Minables.

La línea de tiempo a visualizar a continuación detalla el cronograma estratégico desde la toma de decisiones hasta la implementación de estudios de expansión de reservas. Este cronograma es esencial para entender cómo las decisiones estratégicas tomadas a lo largo de varios meses influyen directamente en las fases operativas y planificación a largo plazo:

Figura 14

Línea de tiempo de verificación de hipótesis con aplicación en unidad minera Constancia



Fuente: Elaboración propia.

- Octubre - Noviembre: Decisión de optimizar el tajo Constancia. Durante estos meses, se realiza un análisis preliminar que destaca la necesidad de reevaluar la planificación existente.
- Diciembre: Estudio del plan de 5 Años. Esta fase involucra la implementación de las estrategias y ajustes planificados, orientados a direccionar las fases de minado con objetivos de maximización de producción de Cobre para la estabilidad de la compañía a corto y mediano plazo.

- Enero - Febrero: Expansión de reservas. Este período involucra la actualización de inputs económicos y geotécnicos, esenciales incrementar en 4 años la vida de la mina e incluir una nueva zona de minado con tres fases en interacción al sur-oeste del Tajo Constanca.
- Marzo - Abril: Reportabilidad al corporativo, con la comparativa de VPN validados por el equipo de Planeamiento Financiero de Canadá.

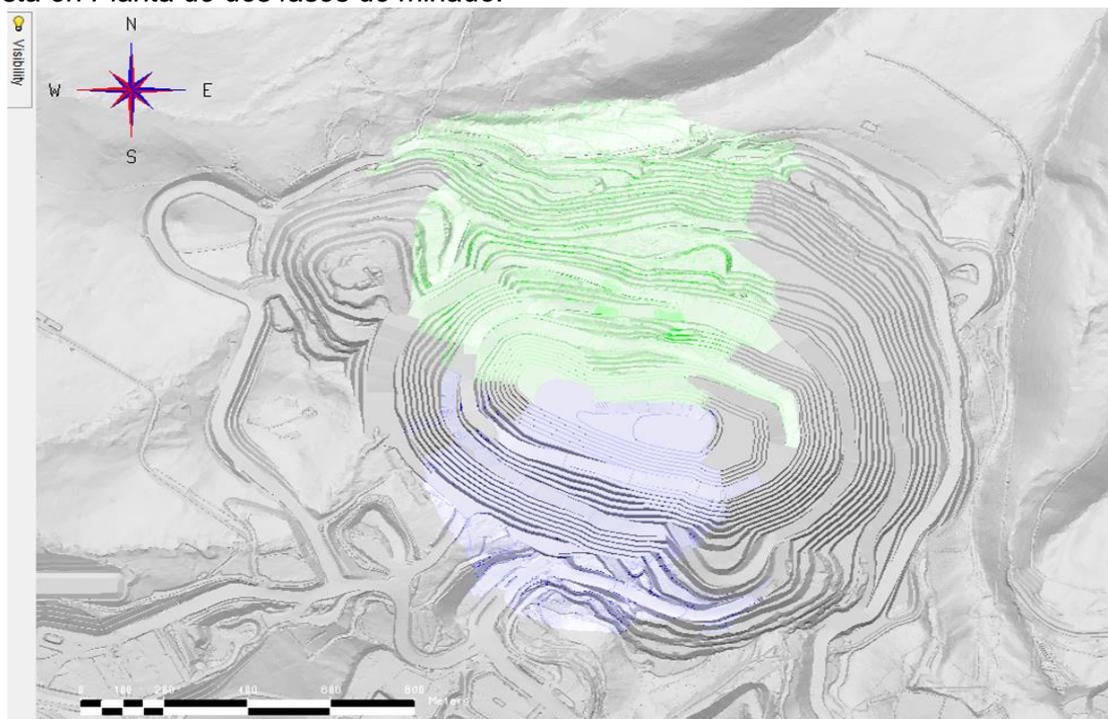
Cada etapa de esta línea de tiempo no solo refleja compromiso con la empresa sino eficacia en traducir nuestra hipótesis inicial en una realidad.

4.2.1 Dirección de fases al Plan de 5 Años (5Y)

En el proceso de optimización para el plan de 5 Años ('5Y' por sus siglas en inglés) de la Unidad Minera Constanca, se realizó el estudio de direccionamiento de las fases de minado, optando por enfocar el minado hacia la pendiente sureste del tajo. Este enfoque está respaldado por algoritmos de secuenciamiento directo de bloques, que consideran restricciones de mina y planta además de las restricciones tradicionales (geotécnicas, económicas, etc.).

Figura 15

Vista en Planta de dos fases de minado.



Fuente: Elaboración propia.

El talud sur ha sido seleccionado a pesar de que implica un Stripping más alto en comparación con la alternativa norte. La elección de dirigirse hacia el sur, zona identificada con una mayor concentración de mineral de alta ley, se basa en una evaluación que incluye las restricciones de capacidad tanto de la mina como de la planta.

La evaluación comparativa ha revelado que, aunque la zona norte del tajo presenta valores standalone potencialmente más altos, la integración de las restricciones operativas y las capacidades actuales de la planta y la mina favorecen una orientación hacia el sureste.

- La fase de minado inicial localizada en el talud norte del tajo tenía un volumen considerable y un tonelaje cercano a los 250 Mt.
- Las posibilidades de sub-fasear esta zona eran limitadas debido a la cota desde la cual se realizaba la etapa de pre-stripping y Stripping, pues mientras el talud sur se localizaba en el nivel 4215 msnm, el talud norte estaba en el 4425 msnm.
- Nuestro algoritmo de “optimización de pit” inicial era sesgado en sugerir que era nuestra siguiente fase en orden de extracción al solo visualizar su “valor standalone”, un concepto ya abordado en el Capítulo III de esta investigación.
- Al tener una capacidad de planta limitada y la inviabilidad de incluir una tercera línea de molienda en un periodo menor a tres años, el estudio se calibró a considerar la capacidad de planta como una restricción en el tiempo. Esto forzaba a establecer que la fase de minado inicial localizada en el talud norte del tajo tenía una duración de aproximadamente 3 años y medio.
- En paralelo, la inclusión de la capacidad de planta como restricción tomada durante la generación las envolventes económicas nos mostraba soluciones en el talud sur del tajo, con un tiempo de vida de 2 años por fase, gracias a la combinación de bajo volumen (partían de una cota más baja) y

Este ajuste en la estrategia no sólo alinea mejor el plan de minado con las capacidades de mina y planta existentes, sino que también maximiza el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto.

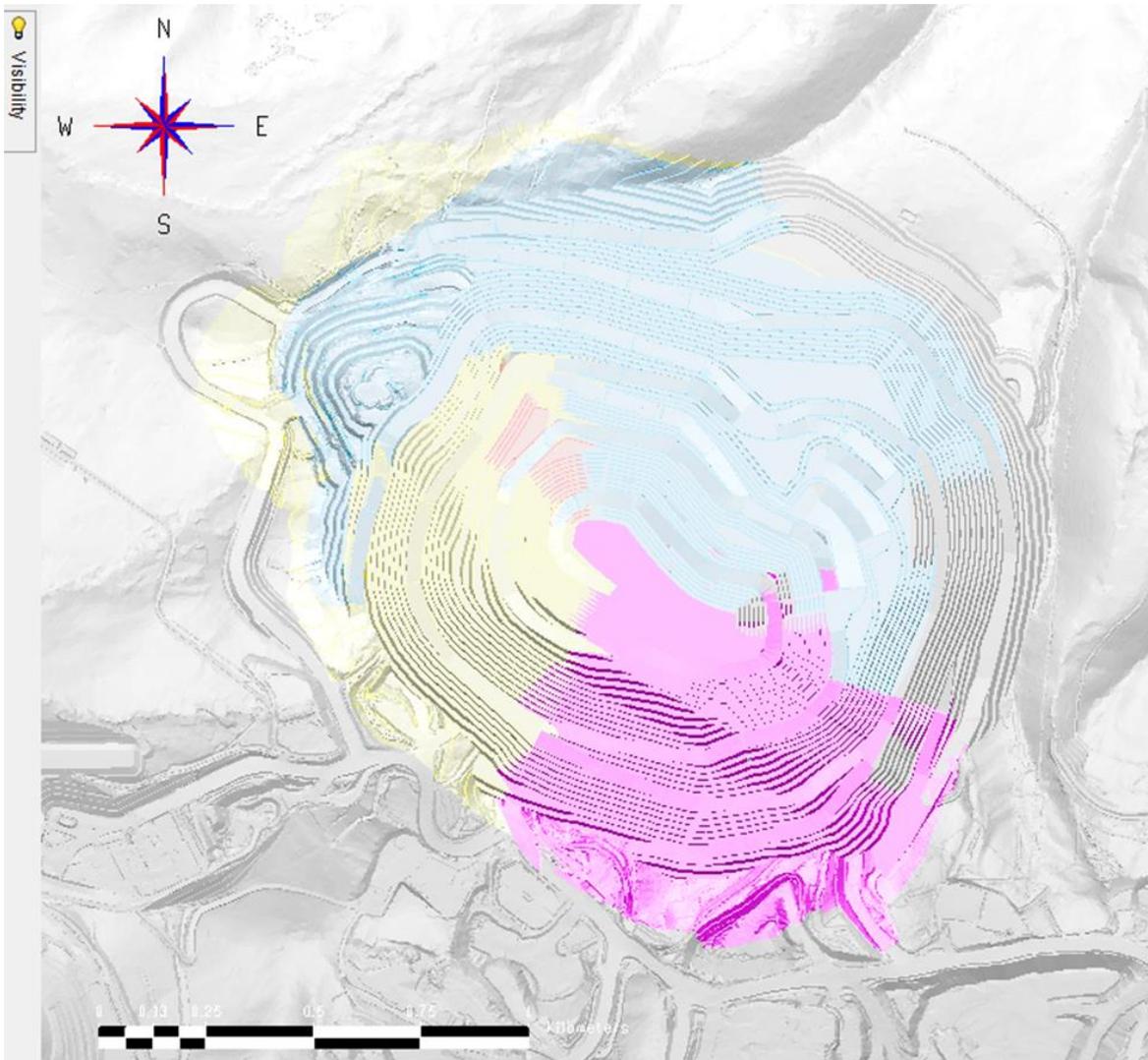
La optimización ha mostrado que, al cambiar el destino del material de baja ley (que anteriormente se destinaba al procesamiento), y redirigirlo directamente a los stockpiles, se incrementan los ingresos esperados. Además, se capitaliza más desmonte por deferred Stripping. Esta modificación estratégica ha resultado en una mejora sustancial del VPN de la Unidad Minera Constancia, **incrementándolo en 40 millones de dólares**. Este estudio refuerza la importancia de considerar las capacidades operativas y las restricciones de mina y planta en la planificación minera.

4.2.2 Direccinamiento de fases para Ampliación de Reservas

El proceso de expansión de reservas en la Unidad Minera Constancia, centrado en la Fase 10 del tajo, ilustra un enfoque de expansión de reservas bajo las restricciones operativas y de capacidad de planta, con el foco en obtener un diferencial de VPN positivo (agregar no solo vida de mina sino además valor).

Figura 16

Vista en Planta de tres fases de minado



Fuente: Elaboración propia.

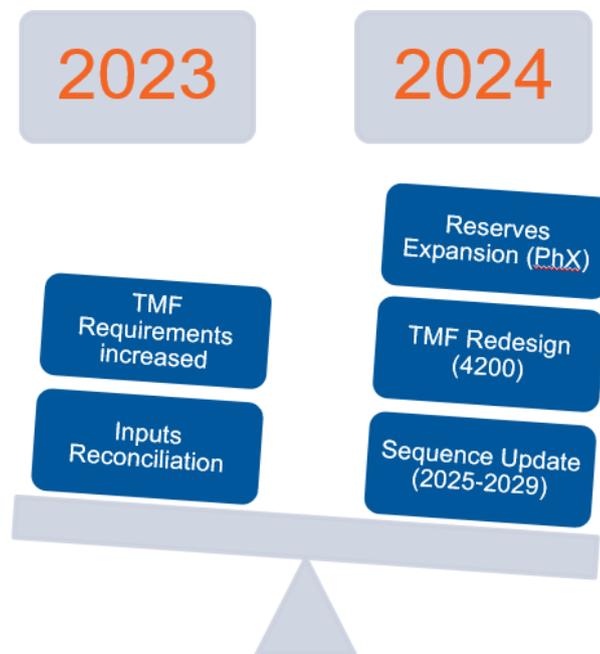
- En un estudio preliminar, se sugirió un exceso de desmonte para esta fase en la pendiente sur. Esto por su ubicación bajo la falla geológica regional “Falla Yanak”.
- Al aplicar los algoritmos de restricción de mina y planta, se aperturan tres zonas de minado distintas (magenta, celeste, amarillo), que incluye partes de la pendiente sur con costos de desmonte ya compensados por una fase intermedia.
- El adelanto de desmonte en el talud sur es estratégico, pues prepara una expansión considerando algunos costos de Stripping como costos hundidos por estas fases intermedias, para exposición de mineral de alta ley, también en el talud sur del tajo,

siguiendo con el minado del talud norte y, posteriormente, avanzando hacia el masivo talud noroeste de baja ley hacia el final de la vida de la mina.

- El Stripping requerido para la zona sur mineralizada bajó de 2.8 a 1.8, lo cual permitió adelantar las zonas objetivo de alta ley.
- El incremento en métricas finales que sí es de conocimiento público fue de 80 Mt de Reservas Minables, lo cual, asociado al secuenciamiento del minado de “Fase Magenta” temprano, logró un incremento de VPN de 50 M\$ adicionales.

Figura 17

Variables influyentes en la medición de variación de Valor presente neto entre 2023 y 2024 para unidad minera Constanca



Fuente: Elaboración propia.

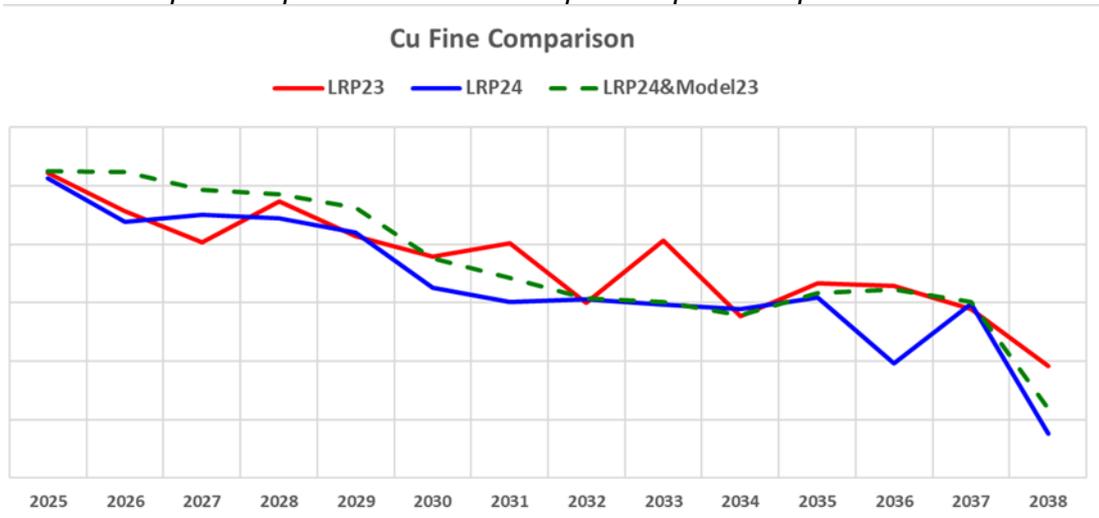
Esto permitió que el incremento de 40 M\$ por la optimización del Plan de 5 Años sumados a los 50 M\$ por la expansión de Reservas Minables puedan contrarrestar contextos adversos en la previsualización del VPN para el corporativo.

4.3 Comentarios a resultados

En el contexto de la optimización del Plan de Minado en la Unidad Minera Constanca, el gráfico de comparación de Cobre Fino resalta significativamente el impacto del redireccionamiento estratégico de las fases de minado, ajustado en función de las restricciones de capacidad de mina y de planta.

Figura 18

Tendencias de perfil de producción de Cobre por año para tres planes de minado.



Fuente: Elaboración propia.

Este redireccionamiento ha sido esencial especialmente al enfrentar los desafíos presentados por la actualización del modelo de bloques, representada por la línea azul, donde se observa una reducción en el contenido estimado de cobre. A pesar de esta disminución en el metal contenido, los ajustes al secuenciamiento y el redireccionamiento de las fases de minado han permitido que la operación de 'Constancia' sostenga sus niveles de producción esperados, mitigando potenciales impactos negativos en el flujo de caja a mediano plazo.

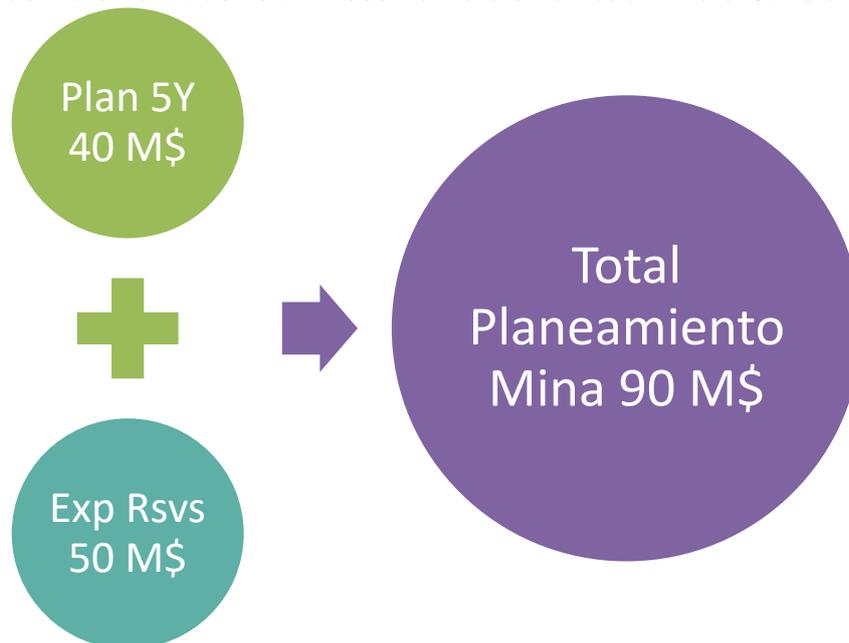
El análisis y las decisiones tomadas demuestran nuestra capacidad para adaptar las estrategias de planificación a cambios inesperados en las estimaciones de recursos, asegurando que la Unidad Minera Constancia pueda continuar cumpliendo con sus compromisos de producción y financieros. Esto no solo refleja la agilidad y el detalle técnico del equipo de planificación minera, sino que también subraya la importancia de contar con sistemas de modelamiento y planificación flexibles y sólidos, que puedan responder dinámicamente a las fluctuaciones en los inputs recibidos ya sea por estimación geológica, presa de relaves, precios de metales, etc.

En 'Constancia', la integración del Plan de 5 Años junto con el Plan de Expansión de Reservas Minables ha demostrado ser una estrategia efectiva para fortalecer la rentabilidad a mediano plazo y la sostenibilidad de la operación a largo plazo.

La estrategia desarrollada en el Plan de 5 Años, particularmente el redireccionamiento de las fases de minado con base en restricciones de capacidad de mina y planta, han mejorado el Valor Presente Neto (VPN) en 40 M\$, mientras que las estrategias aplicadas en la fase de expansión de reservas han añadido otros 50 M\$ al VPN, totalizando una mejora de 90 M\$ respecto al plan de minado del año anterior.

Figura 19

Resultados de incremento de valor Presente Neto en unidad minera Constancia



Fuente: Elaboración propia.

Esto han permitido a 'Constancia' no solo mantener sino mejorar su perfil de producción de cobre, a pesar de la disminución de metal contenido en las estimaciones geológicas.

Esta gestión de recursos y la consideración de restricciones de capacidades de mina y planta es un modelo para la industria, pues estamos demostrando cómo la investigación en el secuenciamiento de minado bajo simples conceptos matemáticos de optimización de pit nos pudo y puede llevar a resultados que benefician tanto a la empresa como a sus stakeholders.

Conclusiones

El redireccionamiento estratégico de las fases de minado, incorporando restricciones de capacidad de mina y planta, ha demostrado ser crucial para optimizar el plan de minado de una operación, con mejoras notables en el Valor Presente Neto (VPN) de la Unidad Minera Constanca.

La implementación de algoritmos actualizados ha permitido precisar los “shapes” de las fases de minado, lo que ha contribuido a secuenciamientos de minado con foco en el valor presente neto sin descuidar la viabilidad de tonelaje movido.

La capacidad de planta y de mina determina directamente la viabilidad del plan, destacando la importancia de un secuenciamiento que sincronice estas capacidades con las fases de minado.

La flexibilidad en el diseño de fases y secuenciamiento de minado, ajustándose a la actualización de inputs por otros stakeholders del área de Planeamiento Mina, ha sido fundamental para sostener y mejorar el flujo de caja y el VPN.

Integrar conceptos financieros es crucial para la optimización del Plan de Minado, y ver mucho más allá de la producción de metal de interés o el cumplimiento de restricciones operativas.

Los escenarios de optimización de pit desarrollados en U.M. Constanca han permitido anticipar variaciones en el modelo de bloques y en requerimiento incrementado de material para la presa de relaves, y ajustar las estrategias de minado a esto, lo que ha resultado en una mejor gestión de riesgos.

Esta implementación de prácticas innovadoras (el “know-how”) y el uso de algoritmos actualizados en la delimitación de pitshells guía de diseño de las fases de minado establecerá un precedente para la mejora continua y la maximización de VPN en proyectos mineros.

Recomendaciones

Continuar en la búsqueda de las herramientas de optimización de pit en mercado para más precisión en secuenciamiento de minado.

Adaptar dinámicamente los planes mineros a cambios de input y/o consideraciones para maximizar el valor presente neto. No quedarse con una versión desactualizada.

Realizar estudios periódicos sobre la capacidad de la planta y la mina para ajustar las los planes de minado a la operación continuamente.

Realizar análisis de riesgo de lado a lado con el Plan de Minado para prever y planificar anticipadamente cualquier desafío y ajustar estrategias de secuenciamiento con tiempo.

Integrar consideraciones de sostenibilidad en todas las fases de planificación y operación para asegurar la viabilidad a largo plazo del proyecto y su adherencia con la operación.

Establecer un proceso continuo de revisión y mejora de las prácticas de planificación minera basado en tecnologías emergentes de la 'Minería 4.0'.

Invertir en la capacitación y desarrollo de los equipos para que puedan utilizar eficazmente las herramientas y técnicas de análisis avanzadas.

Explorar y evaluar nuevas tecnologías y metodologías para el secuenciamiento de minado que pueda ofrecer ventajas competitivas tanto en valor presente neto como en operatividad.

Referencias bibliográficas

- Amini, M., Allijani, F., & Mozaffari, Z. (2015). Economic evaluation of mining projects under conditions of uncertainty for prices and operating costs. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 10(3), 881-890.
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/94410535/IJIAS-15-058-11-libre.pdf?1668705190=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEconomic_evaluation_of_mining_projects_u.pdf&Expires=1718038847&Signature=C70~Ze9JOJwpINEz0rnTT1BOP~VHJzejzrmb8gRLJ6llrs1ErakwwpBRCQ0NxlM8qlwNrQP49w9HXoubTmUT4gbY-ak9llhbFzG~Mpo~8Z6lKjkRmK5x1bloqQu-EtupcMM9A59xNI3ZMEOh8iCrOSschj4g0aD6RiRDRWo4nxxXmdZPRZ5O~ZLow--F3amOO1yeldr8oEjvO-c8UxmsBI0H--EXDXhwM0SvEUTPVVasE6ll8FwrfaV-bdMtfHY0rGSLZNJpQxzD7YnzcDNKQGDJFKqDILMUZJdjAReVhXy9bWpKRPinL NW7QlVuJ~cmT2EvZysSkTbgW0maxLFdPQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Bruijl, G. H. T. (2018). *The Relevance Of Porter's Five Forces In Today's Innovative And Changing Business Environment*. BizChange (NZ) Ltd.
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3192207
- Bumo-Motswaiso, K., & Suglo, R. S. (2022). Economic evaluation of materials handling systems in a deep open pit mine. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 13(1), 37-48.
<https://www.inderscienceonline.com/doi/epdf/10.1504/IJMME.2022.124144>
- Campos, P. H. A., Cabral, I. E., Ortiz, C. E. A., & Morales, N. (2018). Comparison between the application of the conventional mine planning and of the direct block scheduling on an open pit mine Project. *REM - International Engineering Journal*, 71(2)
<https://www.scielo.br/j/remi/a/hkT9MWFbZsVhGsZfqpn9zmw/?format=pdf&lang=en>

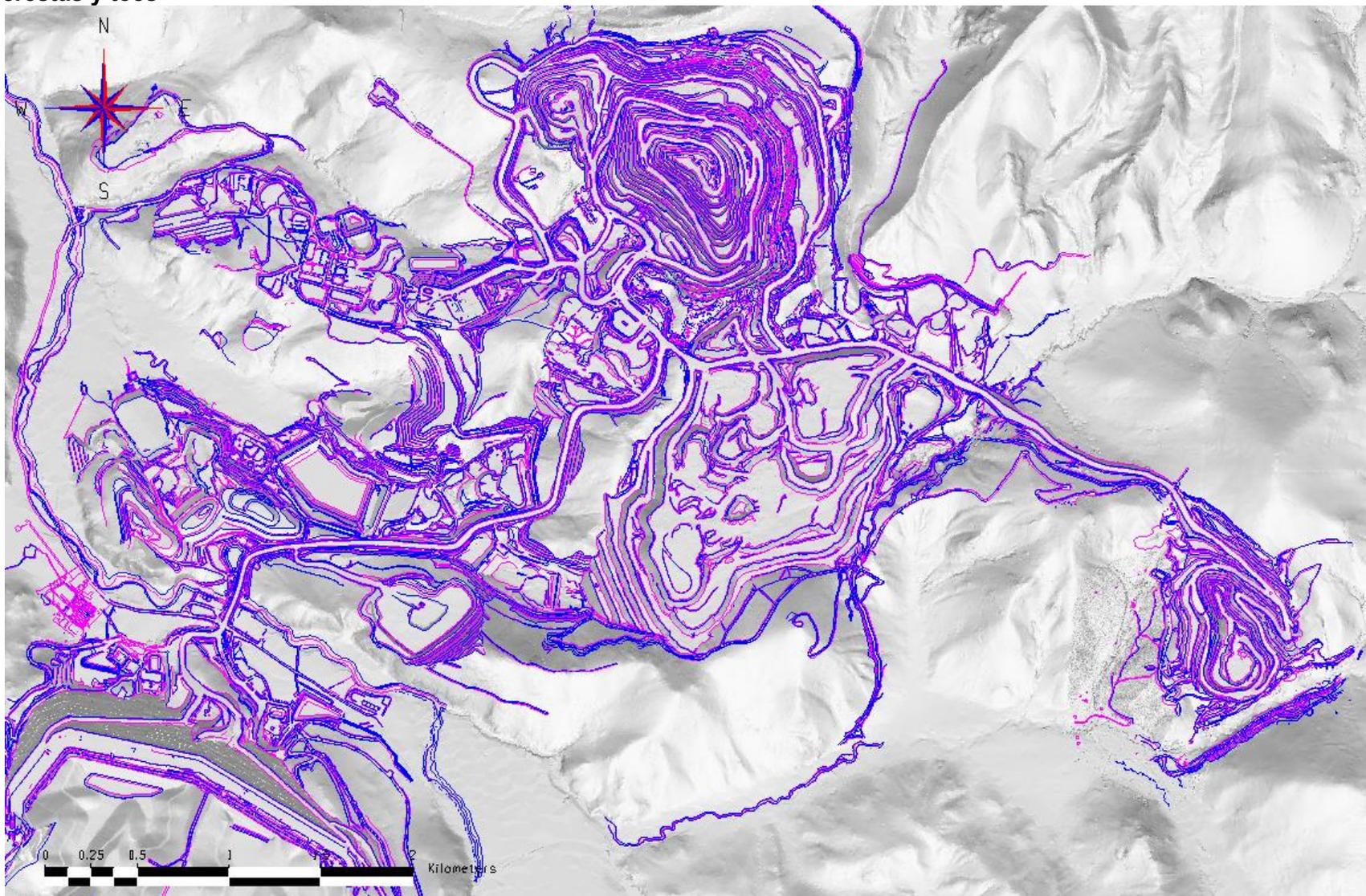
Campos, P.H.A., Arroyo, C.E., & Morales, N. (2018). Application of optimized models through direct block scheduling in traditional mine planning. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(4). DOI: <https://scielo.org.za/pdf/jsaimm/v118n4/11.pdf>

Morales, N., Jélvez, E., Nancel-Penard, P., Marinho, A., & Guimarães, O. (2015). A Comparison of Conventional and Direct Block Scheduling Methods for Open Pit Mine Production. Department of Mining Engineering & AMTC, Universidad de Chile, Santiago, Chile & MiningMath Associates, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. https://www.delphoslab.cl/Publicaciones/2015/MJNMG_A2015.pdf

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Topografía de la U.M. Constancia al 01 de enero de 2024 (de conocimiento público) con visualización de superficie, crestas y toes.....	1
Anexo 2: Generalidades de Tajo Constancia de Conocimiento Público	2
Anexo 3: Metodologías de Cálculo aproximadas para horas de equipos desde el Plan de Minado.....	3
Anexo 4: Trabajos de modelamiento geotécnico que soportan el plan de minado de U.M. Constancia.....	4
Anexo 5: Metodología Tradicional vs Secuenciamiento Directo de Bloques: Teoría descrita por Alexandre Marinho y Octavio Guimarães, Belo Horizonte, Brasil.....	10

Anexo 1: Topografía de la U.M. Constanza al 01 de enero de 2024 (de conocimiento público) con visualización de superficie, crestas y toes



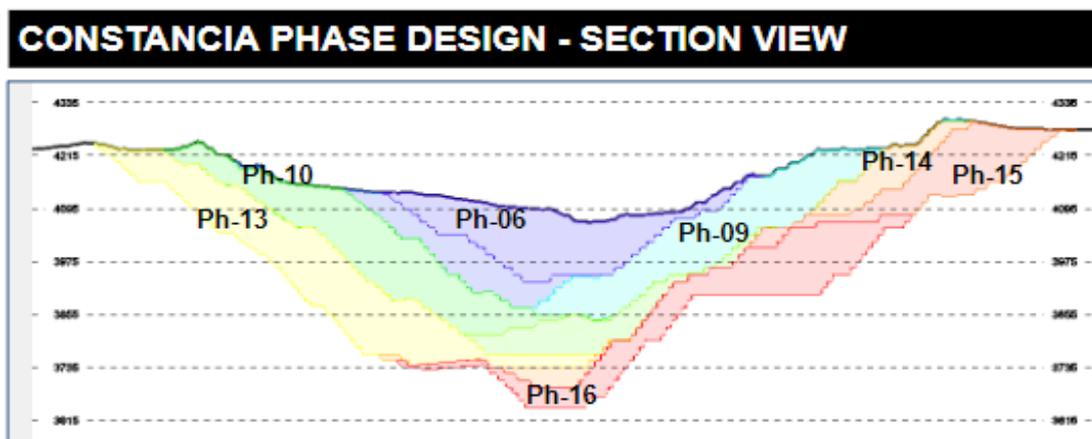
Anexo 2: Generalidades de Tajo Constancia de Conocimiento Público

Constancia es una operación tradicional de tajo abierto que utiliza la minería convencional de camiones y palas. El diseño final del tajo tendrá aproximadamente 1.9km de este a oeste, 1.8km de norte a sur y una profundidad máxima de aproximadamente 780m. El diseño final del tajo de Pampacancha tendrá aproximadamente 0.6km de este a oeste, 1km de norte a sur y una profundidad máxima de aproximadamente 300m para las dos etapas del tajo desarrolladas para Constancia y dos etapas para Pampacancha.

Se utilizan bancos de 15m de altura con equipos mineros de gran escala: perforadoras rotativas de 10-5/8 pulgadas de diámetro, palas hidráulicas de clase de 27 metros cúbicos, cargadores frontales de 19 metros cúbicos y camiones de transporte fuera de carretera de 240 toneladas.

La estrategia de desarrollo por fases consiste en: (1) extraer las leyes más altas de metal con los menores ratios de desbroce durante los primeros años; (2) permitir transiciones suaves en la extracción de desmonte durante la vida útil de la mina para asegurar suficiente exposición de mineral para el procesamiento en la planta.

Figura: Ilustración de un set de fases alternativo, no oficial, en U.M. Constancia.



Se implementa una estrategia de ley de corte variable para adelantar la extracción de mineral de alta ley desde el tajo a la parte inicial del programa de producción.

El alimento prioritario de la planta consiste en material de mayor ley primero. El material de ley más baja se procesa según se necesita o se envía a pilas de almacenamiento de mineral a largo plazo y se recupera al final de la vida útil de la mina.

Anexo 3: Metodologías de Cálculo aproximadas para horas de equipos desde el Plan de Minado

Figura: Ilustración conceptos de horas disponibles de equipos en U.M. Constanca.



Figura: Ilustración de fórmulas de utilización y horas operativas en U.M. Constanca.

$$\text{Avail Hr/Day} = \text{Op Hr} + \text{Delay Hr} + \text{Standby Hr} + \text{Down Hr}$$

Availability =	$\frac{\text{Op Hr} + \text{Delay Hr} + \text{Standby Hr}}{\text{Op Hr} + \text{Delay Hr} + \text{Standby Hr} + \text{Down Hr}}$
Use of Availability =	$\frac{\text{Op Hr} + \text{Delay Hr}}{\text{Op Hr} + \text{Delay Hr} + \text{Standby Hr}}$
Use =	$\frac{\text{Op Hr}}{\text{Op Hr} + \text{Delay Hr}}$

$$\frac{\text{Cycle Time (Hours / travel)} \times \text{Tons by period (Tons)}}{\text{Payload by truck (Tons / travel)}} = \text{OP. Hours}$$

Anexo 4: Trabajos de modelamiento geotécnico que soportan el plan de minado de U.M. Constancia

El tajo tiene dos zonas, NE y SW, ambas zonas delimitadas por la falla Yanak.

Se registraron los taladros, se actualizaron las propiedades y el mapeo de los bancos minados nos ayudó a conciliar el modelo, con estos valores actualizados corrimos estabilidades con escenarios de optimización favorables (+1 o +2°).

Figura: Ilustración de re-logueo y mapeo en U.M. Constancia

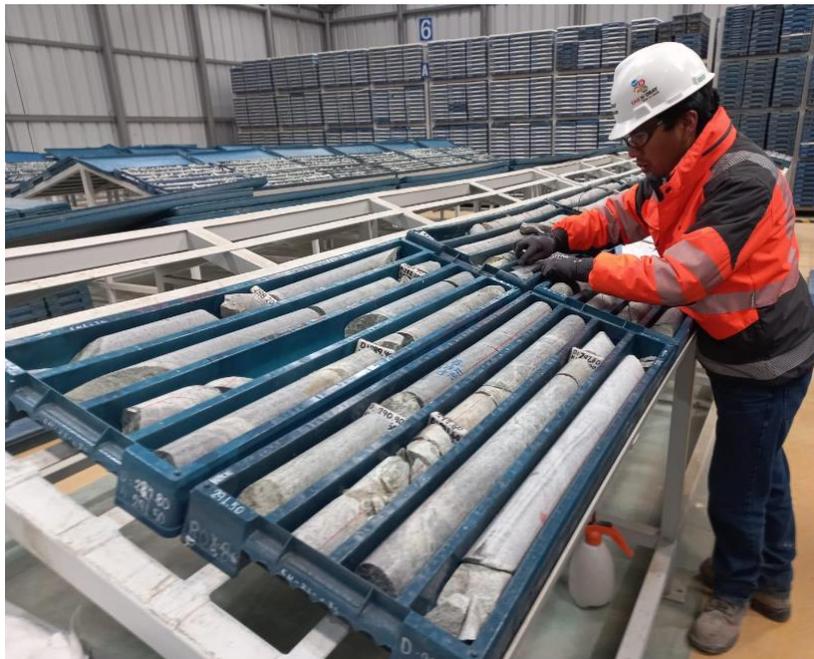


Figura: Ilustración de Análisis de Estabilidad en U.M. Constanca

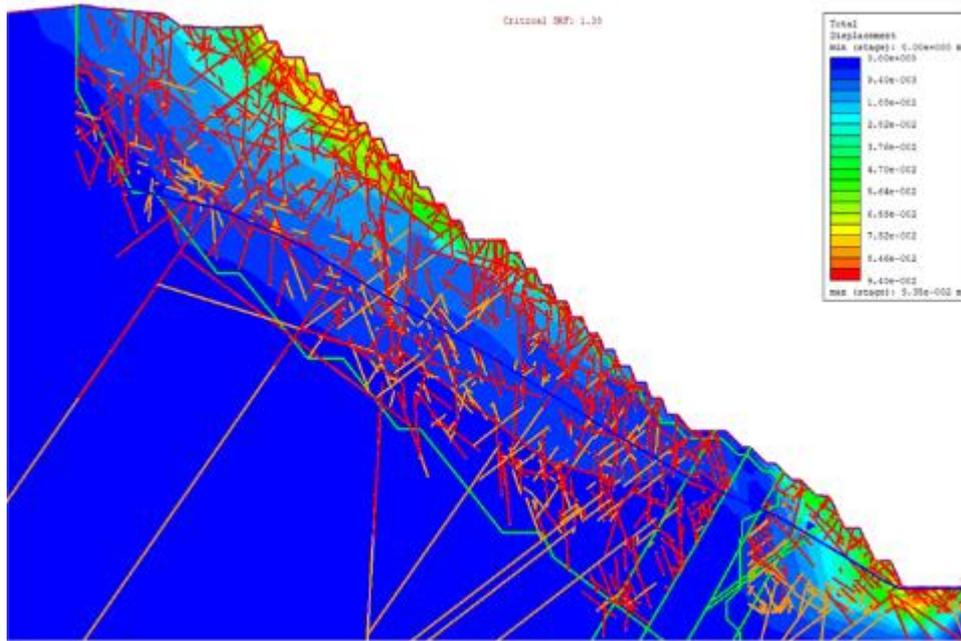


Figura: Ilustración de Campaña de Perforación en U.M. Constanca

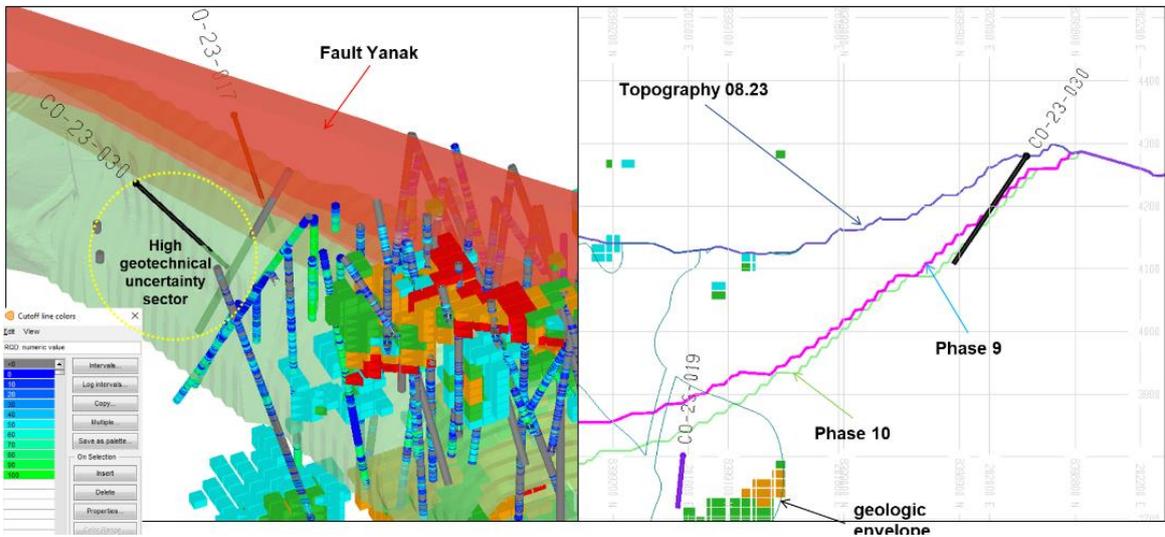


Figura: Ilustración de Sectores Geotécnicos en U.M. Constanza, con resalto de Falla Yanak

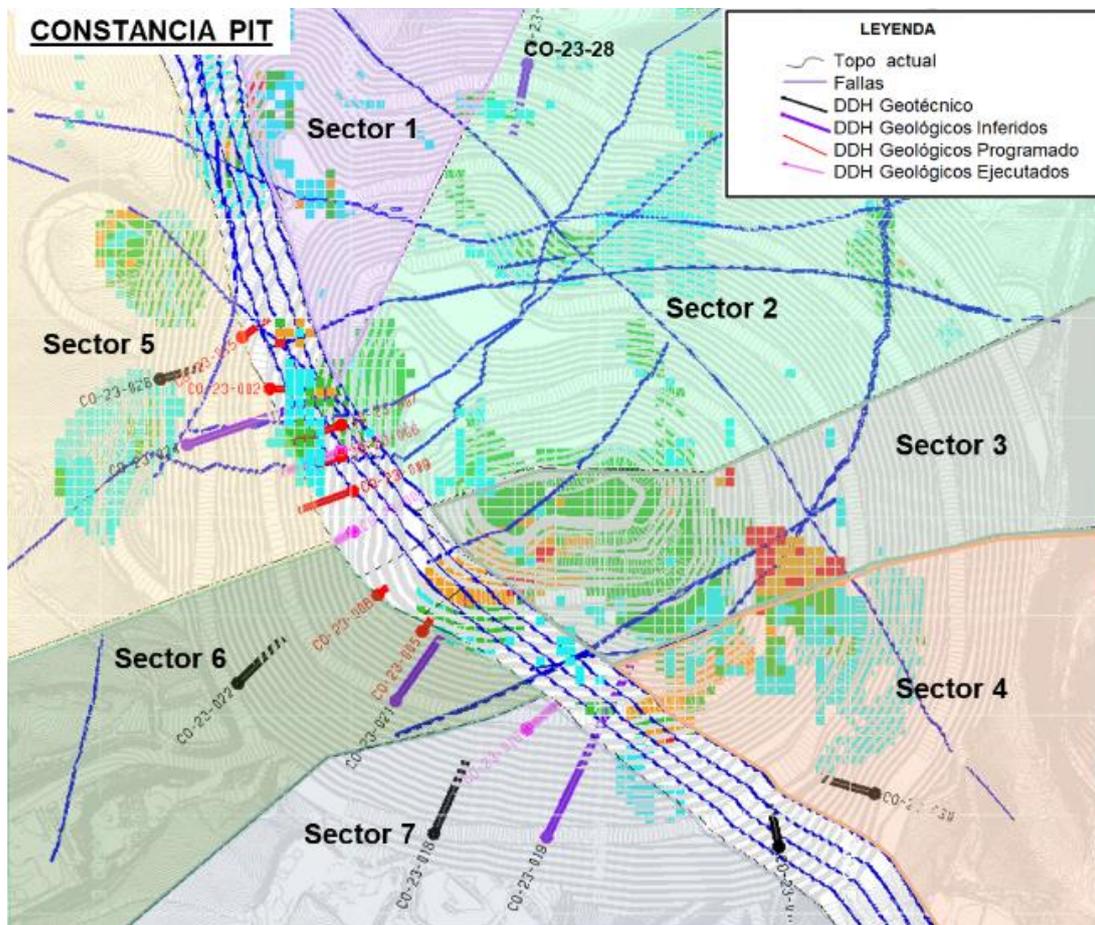


Figura: Ilustración de Estudio Hidrogeológico en U.M. Constanca, con resalto de Falla Yanak

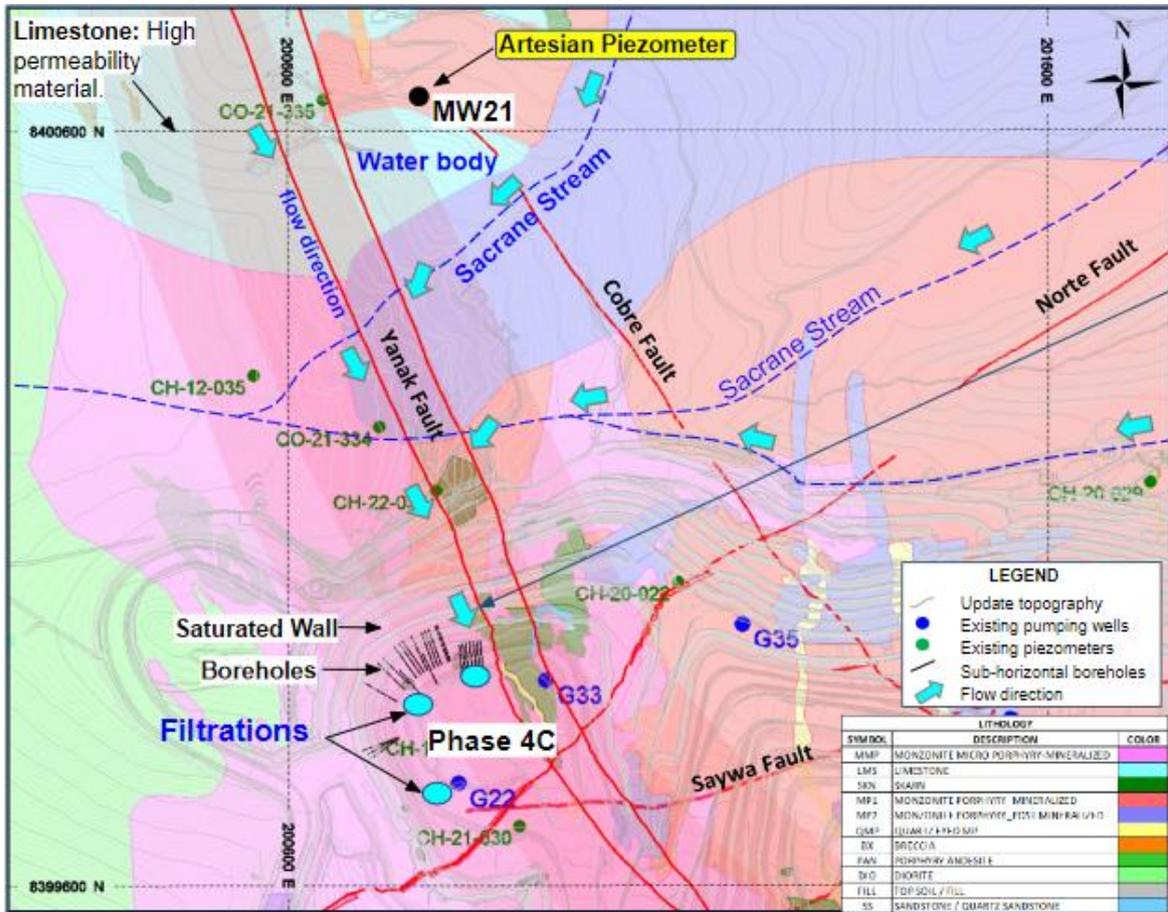


Figura: Ilustración de incremento de estabilidad por plan de bombeo de agua en U.M. Constanca

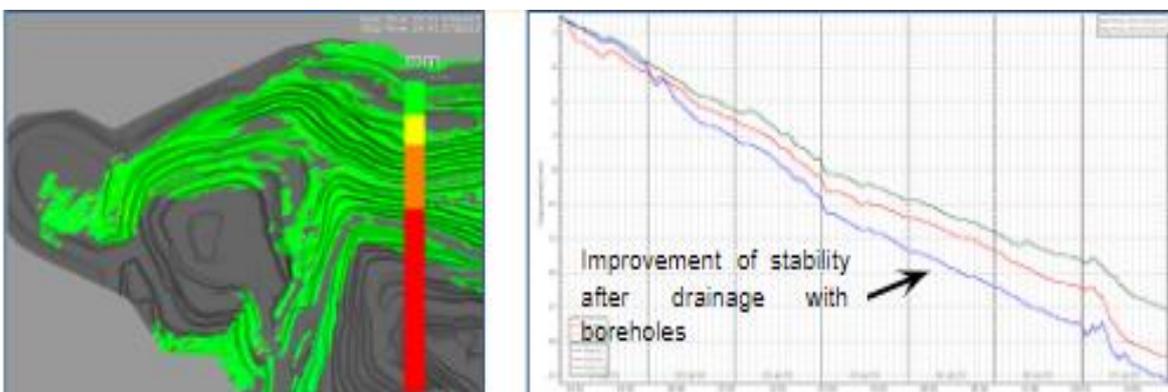


Figura: Ilustración A (vista en planta) de una fase candidata a expansión de reservas, no oficial, en U.M. Constanca.

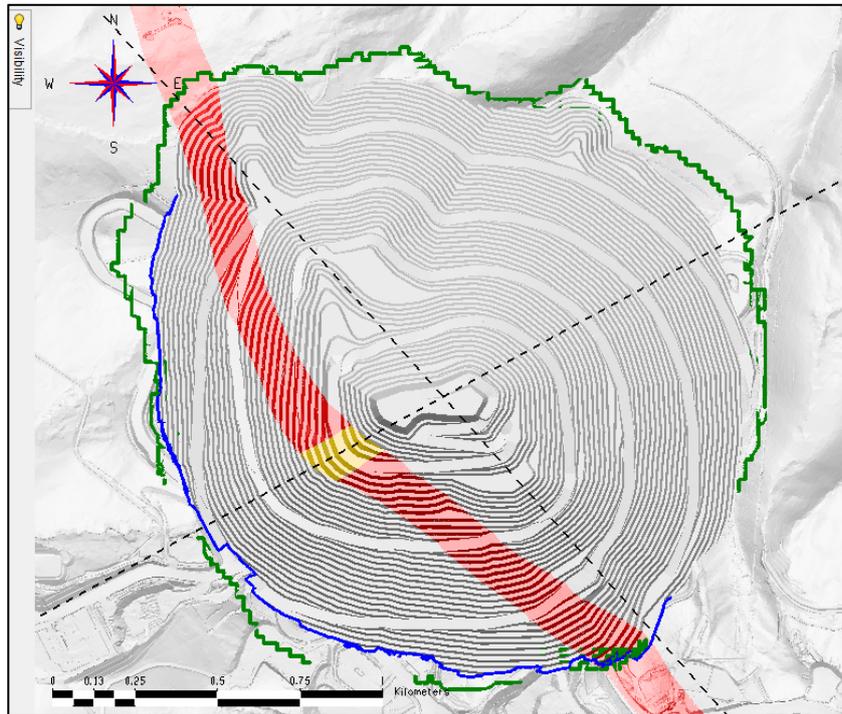
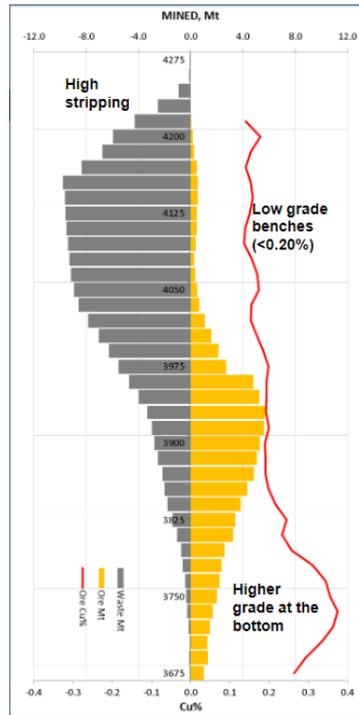
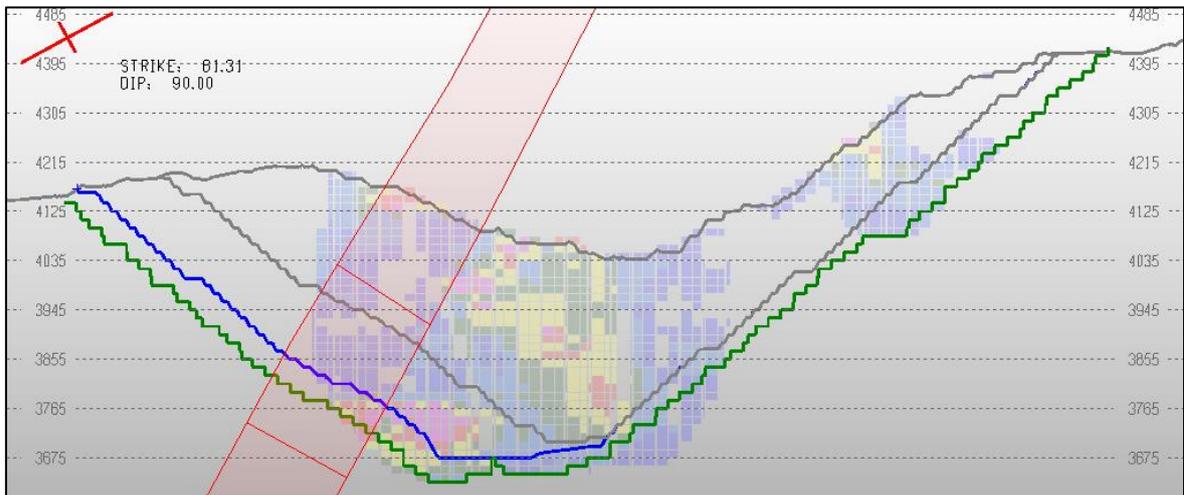


Figura: Ilustración B (vista en sección) de una fase candidata a expansión de reservas, no oficial, en U.M. Constanca.



Anexo 5: Metodología Tradicional vs Secuenciamiento Directo de Bloques: Teoría descrita por Alexandre Marinho y Octavio Guimarães, Belo Horizonte, Brasil

“Una tarea muy importante en el proceso de planificación minera es el cronograma de largo plazo, en el cual se debe programar la extracción de los bloques mineros en un conjunto de años y se debe asignar un destino a cada uno de ellos. Este secuenciamiento está sujeto a diferentes restricciones operativas y económicas (capacidad de procesamiento, ángulos de pendiente, etc.) y está orientado a optimizar el valor, muchas veces expresado en términos del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto.

Existen dos enfoques principales para esta tarea. El primero se basa en la construcción de Tajos Anidados mediante el algoritmo de Lerchs-Grossmann (LG) (Lerchs & Grossman 1965). Este método depende del uso de un factor de ingresos que modula los tamaños de los tajos penalizando el precio en la valoración de los bloques, seguido de otros algoritmos para la programación, por ejemplo, Millawa y cutoff optimization (Gemcom 2011).

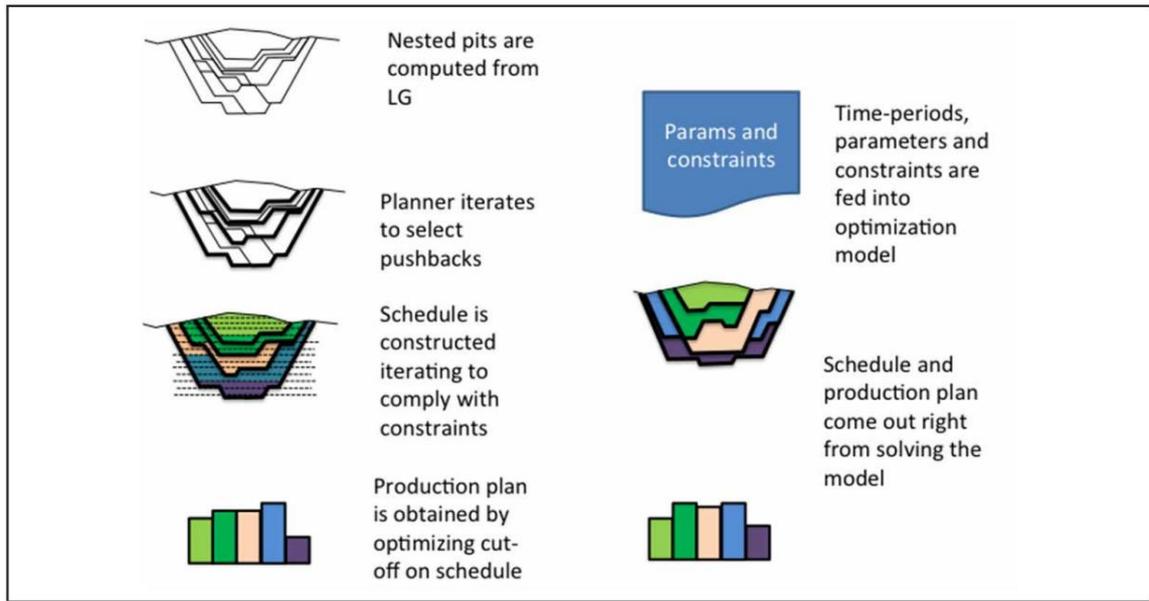
El segundo enfoque se basa en la programación directa de bloques (DBS), que consiste en asignar directamente períodos de extracción por medio de un problema de optimización matemática subyacente (Johnson, 1968). Aunque este enfoque es teóricamente mejor, presenta el problema de la complejidad computacional para resolver los problemas matemáticos, que puede ser muy grande. Por esta razón, muchos autores han trabajado en desarrollar esquemas para abordar variaciones de este problema (ver Caccetta y Hill 2003; Chicoisne et al. 2012; Bienstock y Zuckerberg 2010 para algunos ejemplos, y Newman et al. 2010 para una revisión).

Afortunadamente, en años posteriores, la disponibilidad de nuevos algoritmos y tecnología computacional ha hecho que el DBS consuma menos tiempo y, por lo tanto, sea más competitivo. Esto, a su vez, ha motivado más investigación en el área y, por ejemplo, actualmente se ha publicado MineLib (Espinoza et al., 2013), una biblioteca pública de casos de estudio donde es posible comparar diferentes metodologías para DBS.

Método convencional para la programación de la producción (Whittle)	Secuenciamiento Directo de Bloques
<p>De manera muy resumida, el método convencional basado en los algoritmos de Lerchs y Grossman se puede expresar de la siguiente manera</p> <p>Calcular los pits anidados usando Lerchs y Grossman, parametrizando los valores del bloque usando un factor de ingresos.</p> <p>Seleccionar pits anidados.</p> <p>Generar un cronograma de producción utilizando bloques en cada pitshell.</p> <p>Mejorar el cronograma de producción optimizando las leyes de corte.</p>	<p>DBS busca integrar todos los pasos anteriores, de modo de cumplir con algunas restricciones, como la capacidad total o de la planta. Este enfoque se basa en la programación matemática y algoritmos ad-hoc para resolverlos. Aunque DBS sí se basa en la optimización matemática para calcular los planes de minado, no se apoya en arcos de precedencia para representar restricciones relacionadas con los taludes, sino directamente con superficies. Esto permite integrar restricciones operacionales, como un ancho mínimo en la base, tasas de avance vertical y capacidades de mina y planta.</p>

La Figura 1 compara brevemente las dos metodologías principales para la programación minera. A la izquierda, el método convencional que se basa en LG para generar pits anidados que se utilizan como base para seleccionar los retrocesos y luego programar la producción. A la derecha, el método DBS, en el que todos los parámetros y restricciones se introducen en un modelo de optimización cuyas soluciones son el cronograma y un plan de producción. Es importante señalar que, para el método convencional, el cumplimiento de las restricciones es algo que el planificador debe garantizar, mientras que los modelos de optimización no pueden producir soluciones que violen una restricción.”

Figura: Metodología tradicional vs Secuenciamiento Directo de bloques



Prueba de DBS en Modelo Ficticio Marvin, desarrollada por Alexandre Marinho

Instance Name	Description	#Blocks	Capacity Constraints
MARVIN	A synthetic block model from GEMCOM Whittle software. It contains copper and gold grades. Block sizes are 30x30x30 meters.	53,271	Plant Capacity 20Mtons/period Mining Capacity 60Mtons/period

Tabla: Parámetros de testeo con Modelo Ficticio Marvin

Las columnas presentadas en cada tabla son las siguientes:

Periodo: período de tiempo en el plan de producción, en años.

Mineral: producción de mineral para el período de tiempo dado, en Mt.

Desmante: producción de desmante para el período de tiempo dado, en Mt.

Ley de cabeza: ley promedio del mineral principal para el período de tiempo correspondiente. Esto puede ser en porcentaje o en oz/ton.

Valor Desc.: flujo de caja descontado del período de tiempo dado, en M\$.

Period	SimSched				Método Tradicional			
	Prod. (Mt)	Waste (Mt)	Grade %	Disc. value (M\$)	Prod. (Mt)	Waste (Mt)	Grade %	Disc. value (M\$)
1	20.1	14.6	0.44	126.1	20.0	40.0	0.34	74.1
2	20.1	9.0	0.65	139.6	20.0	12.8	0.53	112.2
3	20.1	9.7	0.69	123.4	20.0	6.9	0.62	111.8
4	20.2	12.6	0.70	109.4	20.0	2.1	0.76	134.2
5	20.1	7.8	0.70	96.1	20.0	1.5	0.87	126.8
6	20.1	15.7	0.71	79.5	20.0	13.3	0.74	85.5
7	20.0	15.0	0.66	67.1	20.0	23.2	0.66	60.6
8	20.2	17.1	0.66	55.9	20.0	11.2	0.66	57.9
9	20.2	21.6	0.64	43.4	20.0	23.0	0.62	41.7
10	20.0	20.1	0.58	33.5	20.0	29.2	0.60	31.0
11	20.1	30.7	0.57	23.3	20.0	20.6	0.56	26.6
12	20.1	33.5	0.52	14.8	20.0	34.2	0.52	14.6
13	20.1	29.1	0.47	8.9	20.0	34.5	0.48	8.7
14	4.8	8.8	0.44	0.4	5.5	9.3	0.44	0.8
TOTAL	266.3	245.3	0.61	921.3	265.5	261.7	0.61	886.3

Tabla: Resultados de testeo de algoritmos DBS (SimSched) vs LG (Tradicional)

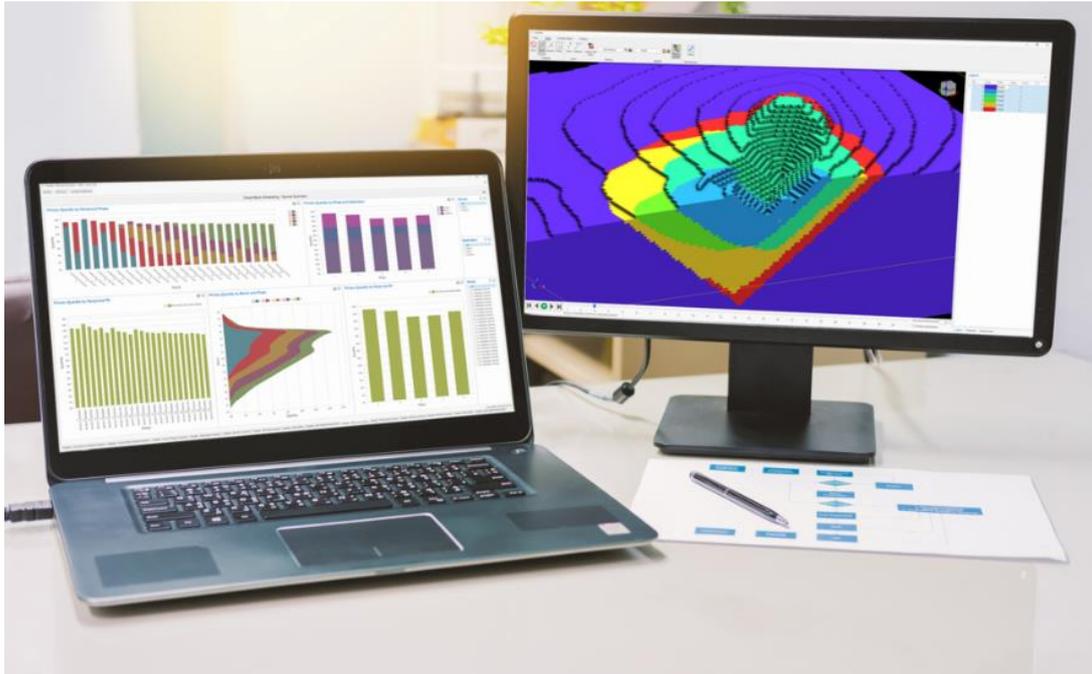
“Hemos comparado los tajos y planes de minado obtenidos de diferentes metodologías: tajos anidados clásicos de LG más secuenciamiento, usando Whittle y DBS. Primero que todo, es interesante notar que, aunque los NPV totales no varían mucho, las geometrías de los tajos y el esfuerzo total para producir las soluciones tienen diferencias considerables.

En términos de metodologías, el método convencional basado en LG es algo más complejo, porque requiere mucha experiencia en pasos manuales, como seleccionar retrocesos. Esta complejidad se traduce en que el proceso general logra un rendimiento similar (en términos de NPV), pero requiere bastante más esfuerzo que recurrir a modelos de secuenciamiento directo de bloques. De hecho, DBS tardó entre 1.0 y 1.5 horas en generar los planes de minado presentados en una sola corrida de optimización, pero el

plan utilizando Whittle requirió unas 15 horas de un planificador bien calificado para una serie de pruebas, hasta que se encontró la mejor solución.”

Este escenario se agrava si se deben añadir consideraciones más complejas como mezclas o restricciones geométricas. Por ejemplo, SimSched o Deswik también puede integrar restricciones geométricas en términos de tamaños de fase mínimos.

Figura: Visualización del ambiente de trabajo de Deswik con el algoritmo DBS



“En términos de las geometrías de tajo, parece haber grandes diferencias, especialmente en los primeros períodos. Esto puede ser solo una consecuencia de los estudios de caso, pero en realidad estas diferencias son las que introducen las variaciones en los NPV.

En general, un resultado principal es que el DBS se está convirtiendo en una alternativa competitiva para optimizar la extracción en tajos abiertos, especialmente para casos complejos o donde se requiere el análisis de múltiples escenarios.”