

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Optimización del ángulo global del Pit final y fases de minado, a
través de sistema de rampa en paralelo**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Jean Carlos Neyra Rodriguez

 [0000-0001-8672-1234](https://orcid.org/0000-0001-8672-1234)

Asesor

MSc. José Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2024

| | |
|------------------------------|--|
| Citar/How to cite | Neyra Rodriguez [1] |
| Referencia/Reference | [1] J. Neyra Rodriguez, " <i>Optimización del ángulo global del Pit final y fases de minado, a través de sistema de rampa en paralelo</i> " [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024. |
| Estilo/Style: IEEE (2020) | |

| | |
|--------------------------------|---|
| Citar/How to cite | (Neyra, 2024) |
| Referencia/Reference | Neyra, J. (2024). <i>Optimización del ángulo global del Pit final y fases de minado, a través de sistema de rampa en paralelo</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style: APA (7ma ed.) | |

Dedicatoria

A mi familia por siempre apoyarme en mi formación académica y haberme inculcados valores y principios. En especial a mi madre Sonia y mi abuela Beatriz que me enseñaron que la perseverancia y la dedicación son la clave para alcanzar nuestros sueños, a mi hermano Anthony por esa hermosa rivalidad que me hizo ser mejor cada día, y a todas las personas que siempre me apoyaron y confiaron en mí.

Agradecimientos

A mi alma mater la Universidad Nacional de Ingeniería y todos mis docentes que estuvieron en cada etapa de formación académica y profesional.

A mis amigos y colegas que he conocido en el desarrollo de este trabajo de suficiencia profesional.

Resumen

El diseño del pit final y las fases de minado en una mina a cielo abierto son fundamentales para maximizar el valor del proyecto minero.

Estos diseños se basan en envolventes económicas determinadas mediante algoritmos de optimización. Un sistema de rampas eficiente no solo mejora el beneficio económico del proyecto, sino que también permite recuperar todas las reservas disponibles minimizando el desmonte necesario para su extracción.

El presente trabajo de suficiencia tiene como objetivo optimizar el ángulo de talud del pit final y las fases de minado utilizando un sistema de rampas en paralelo en una mina de cobre a cielo abierto.

Este sistema permitirá:

- Optimizar ángulo global del talud en $+2^\circ$ en el pit final y fases de minado.
- Mayor beneficio económico del proyecto minero, un incremento 4% en los primeros 5 años y +1.2% como valor del proyecto
- Minimizar la cantidad de desmonte a extraer, aproximadamente un 135 Mton

Palabras clave — Optimización, NPV, fases, talud

Abstract

The design of the final pit and mining phases in an open pit mine are essential to maximize the value of the mining project.

These designs are based on economic envelopes determined through optimization algorithms. An efficient ramp system not only improves the economic benefit of the project, but also allows the recovery of all available reserves, minimizing the clearing necessary for their extraction.

The objective of this sufficiency work is to optimize the slope angle of the final pit and the mining phases using a parallel ramp system in an open pit copper mine.

This system will allow:

- Optimize global slope angle by +2° in the final pit and phases.
- Greater economic benefit of the mining project, an increase of 4% in the first 5 years and +1.2% in project value.
- Minimize the amount of waste to be extracted, approximately 135 Mton

Keywords — Optimization, NPV, phases, slope

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|---|------|
| Resumen | v |
| Abstract | vi |
| Introducción | xii |
| Capítulo I. Parte introductoria del trabajo | 1 |
| 1.1 Generalidades | 1 |
| 1.2 Descripción del problema de investigación | 1 |
| 1.3 Objetivos del estudio | 2 |
| 1.3.1 Objetivo general | 2 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.4 Hipótesis del estudio | 2 |
| 1.4.1 Hipótesis general..... | 2 |
| 1.4.2 Hipótesis específica..... | 2 |
| 1.5 Antecedentes investigativos | 3 |
| Capítulo II. Marcos teórico y conceptual | 5 |
| 2.1 Marco teórico..... | 5 |
| 2.1.1 Metodología tradicional de planificación | 5 |
| 2.1.2 Valorización Económica de bloques. | 5 |
| 2.1.3 Determinación de Pit Final y Pits Anidados | 6 |
| 2.1.4 Diseño de fases..... | 7 |
| 2.1.5 Plan de Producción | 7 |
| 2.2 Marco conceptual | 7 |
| Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación | 9 |
| 3.1 Modelo de bloques | 9 |
| 3.2 Sectores Geotécnico | 10 |
| 3.3 Parámetros Económicos | 10 |
| 3.4 Definición de escenarios | 11 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.5 | Caso Base..... | 12 |
| 3.5.1 | Diseño Pit final y fases | 12 |
| 3.5.2 | Plan de Producción | 14 |
| 3.5.3 | Requerimiento de equipos mineros | 17 |
| 3.5.4 | Evaluación Económica - Financiera..... | 18 |
| 3.6 | Caso Rediseño..... | 22 |
| 3.6.1 | Diseño Pit final y fases | 22 |
| 3.6.2 | Plan de Producción | 25 |
| 3.6.3 | Requerimiento de equipos mineros | 29 |
| 3.6.4 | Evaluación Económica – Financiera..... | 30 |
| | Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados | 34 |
| 4.1 | Cubicación de fases | 34 |
| 4.2 | Plan de Producción | 34 |
| 4.3 | Alimentación de Planta..... | 35 |
| 4.4 | Producción de Cobre..... | 36 |
| 4.5 | Flujo de Caja | 38 |
| | Conclusiones | 40 |
| | Recomendaciones | 41 |
| | Referencias bibliográficas..... | 42 |
| | Anexos | 43 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1: Dimensiones-Modelo de Bloque..... | 9 |
| Tabla 2: Variables Modelo de Bloques..... | 9 |
| Tabla 3: Parámetros Geotécnicos..... | 10 |
| Tabla 4: Precio de los metales..... | 11 |
| Tabla 5: Costos Mina y Proceso | 11 |
| Tabla 6: Cubicación de Fases..... | 13 |
| Tabla 7: Flujo de caja 2024-2033..... | 19 |
| Tabla 8: Flujo de caja 2034-2043..... | 20 |
| Tabla 9: Flujo de caja 2044-2053..... | 21 |
| Tabla 10: Cubicación de fases- Caso Rediseño..... | 25 |
| Tabla 11: Flujo de caja 2024-2033..... | 31 |
| Tabla 12: Flujo de caja..... | 32 |
| Tabla 13: Flujo de caja 2044-2052..... | 33 |
| Tabla 14: Comparativo - Cubicación de Fases..... | 34 |
| Tabla 15: Valor | 38 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1: Sectores geotécnicos..... | 10 |
| Figura 2: Pit final caso Base | 12 |
| Figura 3: Secuenciamiento de fases de minado..... | 13 |
| Figura 4: Plan de producción | 14 |
| Figura 5: Alimentación a planta..... | 15 |
| Figura 6: Ley cobre..... | 16 |
| Figura 7: Ley de molibdeno..... | 16 |
| Figura 8: Ley del oro | 16 |
| Figura 9: Ley de la plata | 17 |
| Figura 10: Requerimiento de equipo de carguío | 17 |
| Figura 11: Requerimiento de equipos de acarreo | 18 |
| Figura 12: Requerimiento de equipos mina..... | 18 |
| Figura 13: Rampas en paralelo - Rampa A..... | 22 |
| Figura 14: Rampas en paralelo - Rampa B..... | 23 |
| Figura 15: Pit final..... | 23 |
| Figura 16: Ángulo de talud..... | 24 |
| Figura 17: Secuenciamiento de fases | 24 |
| Figura 18: Plan de producción | 26 |
| Figura 19: Alimentación a planta..... | 27 |
| Figura 20: Ley de cobre..... | 27 |
| Figura 21: Ley de molibdeno..... | 28 |
| Figura 22: Ley de oro..... | 28 |
| Figura 23: Ley de plata | 28 |
| Figura 24: Requerimiento de equipos carguío..... | 29 |
| Figura 25: Requerimiento de equipos de acarreo | 29 |
| Figura 26: Requerimiento de equipos mina..... | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: Comparativo - Plan de producción | 35 |
| Figura 28: Comparativo - Alimentación de planta..... | 36 |
| Figura 29: Comparativo - Cobre producido | 37 |
| Figura 30: Flujo de caja descontado | 39 |

Introducción

El presente trabajo de suficiencia evalúa el impacto técnico y económico de implementar un sistema de rampas en paralelo. Para este propósito, se desarrollaron dos escenarios: el caso base y el caso rediseño. Se llevaron a cabo procesos unitarios de planeamiento a largo plazo para analizar y comparar ambos casos.

El desarrollo del trabajo se estructura en cuatro capítulos, siguiendo la filosofía de la escalera de conocimiento.

En el Capítulo I, se aborda el problema principal de la investigación, incluyendo pruebas reales, la definición del objetivo central del estudio y una revisión de los antecedentes más relevantes en la industria minera.

El Capítulo II presenta el marco teórico, detallando las técnicas actuales y los procesos unitarios de planificación a largo plazo, con un enfoque en la optimización del pit final y la planificación de la producción del mineral de interés económico.

El Capítulo III, se exponen los hallazgos de la investigación mediante gráficos, tablas y análisis de tendencias, demostrando un incremento del 4% en el valor presente neto del proyecto durante los primeros cinco años y un aumento del 1.2% en el valor total del proyecto al considerar la secuencia global y la optimización del ángulo global de 35.3° a 37.8°

Finalmente, el Capítulo IV ofrece las conclusiones y recomendaciones basadas en el trabajo de investigación realizado

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El diseño del pit final y las fases de minado en minas a cielo abierto es un proceso iterativo que requiere tiempo, experiencia y habilidad técnica del ingeniero. A pesar de estos esfuerzos, la optimización del diseño de la mina puede verse limitada por la falta de técnicas avanzadas, herramientas especializadas, literatura adecuada y tiempo suficiente. El diseño del pit final es crucial para la planificación minera, ya que define las reservas disponibles, las leyes de los minerales y la cantidad de desmonte necesaria para su extracción. Las fases de minado se establecen utilizando algoritmos matemáticos que permiten sectorizar el yacimiento según su valor.

Estos algoritmos guían el minado para extraer primero las zonas de mayor valor con el menor desmonte posible, optimizando así el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto. Transformar este direccionamiento en diseños operativos y llevar a cabo la extracción de estas zonas es un proceso complejo que exige gran experiencia del ingeniero.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo proporcionar nuevas herramientas para el diseño del pit final y las fases de minado, con el fin de mejorar el VPN del proyecto mediante el uso de un sistema de rampas en paralelo. Se comparará el VPN del caso tradicional con el del caso que incorpora este sistema de rampas en paralelo.

1.2 Descripción del problema de investigación

En la actualidad, el diseño de minas es un proceso iterativo que depende en gran medida del tiempo, la experiencia y la habilidad del ingeniero. Este proceso determina la cantidad de reservas disponibles y el volumen de desmonte necesario para su extracción. Generalmente, la diferencia entre la cantidad de material a extraer en el diseño de mina y el Pit Shell, obtenido mediante algoritmos de optimización, es del 5%.

Un sistema de rampas eficiente maximiza el beneficio económico al permitir la recuperación óptima de las reservas disponibles. En contraste, un sistema de rampas

ineficiente puede resultar en una recuperación incompleta de las reservas o en la necesidad de extraer una mayor cantidad de desmonte para acceder a ellas.

El diseño de las fases de minado enfrenta desafíos similares. Un sistema de rampas eficiente facilita la extracción del mineral de mayor ley con un mínimo de desmonte. Sin embargo, al diseñar todas las fases de minado, el Pit final obtenido no siempre coincide con el diseño inicial. Esta discrepancia puede requerir ajustes en el Pit final, lo cual puede impactar negativamente en el beneficio económico del proyecto.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de rampas que Optimizar del ángulo global del Pit final y fases de minado

1.3.2 Objetivos específicos

- Recuperar todas las reservas con la mínima extracción desmonte.
- Mayor beneficio económico del proyecto minero.

1.4 Hipótesis del estudio

1.4.1 Hipótesis general

Se logrará optimizar en ángulo global del pit final cuando se desarrolle el sistema de rampas en paralelos.

- **Variable independiente**

La implementación del sistema de rampas en paralelo al diseño de pit final y fases mineras.

- **Variable dependiente**

Incremento de valor económico.

1.4.2 Hipótesis específica

- Reducción de desmote a extraer.
- Se incrementará el valor económico en 3% o más en los 5 primeros años de operación y más de 1% en NPV

1.5 Antecedentes investigativos

Cristopher Diaz (2017), Planificación minera a cielo abierto considerando diseño óptimo de rampas. Esta investigación compara dos metodologías para el diseño de rampas en minas a cielo abierto: la tradicional y una semiautomática que utiliza programación matemática para la optimización económica.

Los resultados muestran que la segunda herramienta es más robusta y permite analizar distintos escenarios de diseño en un periodo de tiempo limitado, asegurando un diseño óptimo económico.

El procedimiento consiste en diseñar el Pit final Optimo en base a la metodología tradicional en base a dos alternativas:

- Primera: Incorporar rampas mediante modelos matemáticos, a través de una herramienta computacional, que permite ubicar el posicionamiento de la rampa para la maximizar el beneficio económico.
- Segunda: Se utilizo el arte del diseño empleado comúnmente para modelar rampas en los limites finales del tajo.

Pedro Sanhueza (2018), Metodología para el diseño semi automático y optimizado de rampas en múltiples fases en minería a cielo abierto. Esta investigación propone una metodología semi-automatizada para el diseño operativo de fases en minería a cielo abierto, que permita generar rampas en múltiples fases respetando restricciones técnicas, operativas y económicas. Esta metodología se basa en un modelo matemático de optimización iterativo y se aplicó a un caso de estudio. La metodología ahorraría recursos y tiempo del planificador y robustecería el proceso de planificación.

Esta investigación se basa en un trabajo previo que permite resolver le problema de las rampas en una fase.

La metodología se basa en un modelo de optimización, donde mediante varias interacciones se obtiene el direccionamiento de rampas para la maximización del beneficio económico.

En resumen, se propone una solución para mejorar el proceso de diseño operativo en minería a cielo abierto

Jorge Eduardo Miranda V. (2017), Factibilidad de aumentar ángulo de talud globales en mina a cielo abierto. Esta investigación trata sobre el aumento de talud global en minería a cielo abierto es un ejercicio que ha cobrado importancia hasta el día de hoy. Las principales causas que impide aumentar el ángulo global es la voladura y la relajación de tensiones provocada por la explotación de los recursos. Al estudiar las diferentes causas se debe revisar las fortificaciones y equipos de monitoreo disponibles para controlar y asegurar los taludes. Se concluye que el aumento de ángulos de talud puede generar ahorros significativos en costos de carguío y transporte, llegando a un 7,4% en un diseño optimizado de 5° y un ahorro total de 10,24 [MUS\$].

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Metodología tradicional de planificación

Cristopher Diaz (2017), Planificación minera a cielo abierto considerando diseño óptimo de rampas. El libro publicado por Cristopher Diaz Planificación menciona que la planificación a largo plazo es un proceso interactivo que parte de un yacimiento mineralizado estimado mediante variaciones de kriging a partir de sondajes obtenidos del campo. Este cuerpo es modelado en bloques cuyas dimensiones son calculadas en base al tamaño de los equipos, dilución, etc. A partir de ello se realiza la planificación minera.

Este proceso de planificación minera consta:

- Valoración Económica de modelo de bloques
- Determinación de Pit final
- Diseño de Pit final y fases de minado
- Plan de Producción
- Estimación de equipos mina y descarga de botadero
- Evaluación Económica y financiera

2.1.2 Valorización Económica de bloques.

Hustrulid, W.; (1995) "Open pit mine Planning & Design". La valorización consiste en asignar el beneficio que se obtiene al extraerlo, este beneficio es estimado mediante una ecuación que considera los parámetros económicos como el precio de los metales explotados y los costos asociados a su extracción y posteriormente a su procesamiento.

En la siguiente ecuación (1) describe la valorización del bloque.

$$V_b = \text{Max} [(P - Cr\&V) \cdot R \cdot L \cdot T - (CM + CP) \cdot T, -CM \cdot T] \quad (1)$$

Donde:

V_b = Beneficio económico del bloque

P = Precio de venta del metal de interés (USD/t)

CM = Costo de extracción

| | | |
|------|---|---|
| CP | = | Costo de procesamiento |
| R | = | Recuperación metalúrgica del |
| L | = | Contenido del metal de interés en el bloque |
| Cr&v | = | Costo de refinación y venta |
| T | = | Tonelaje del bloque |

El valor del bloque está determinado en extraerlo y procesarlo o solamente extraerlo sin procesarlo.

2.1.3 Determinación de Pit Final y Pits Anidados

Hustrulid, W.; (1995) "Open pit mine Planning & Design". A lo largo de la vida de la mina, el plan para el pit final puede ir cambiando debido a que se cuenta con una mayor cantidad de información como sondajes, nuevos precios de los metales y nuevas tecnologías que permiten aminorar costos, entre otros. Por lo que se debe estudiar con diversos escenarios económicos, planes distintos y diferentes ritmos de extracción (Whittle, 2011).

La metodología tradicional utilizada en la industria minera para la determinación del pit final y pits anidados se basa en el algoritmo de Lerchs y Grossman (1965).

Este algoritmo (LG) utiliza la teoría de grafos y la programación dinámica para generar un límite de tajo óptimo para un modelo de bloque económico de un cuerpo mineral y el desmonte asociado a su extracción. El algoritmo toma en cuenta los parámetros geotécnicos y económicos para determinar su extracción. LG proporciona una solución matemáticamente óptima al problema de maximizar el valor del pit y sigue siendo utilizado y aceptado en la industria después de 58 años.

Para la generación de los pits anidados, se utiliza un factor multiplicador del beneficio asociado a la extracción de cada bloque, este factor corresponde a un ponderador del precio (Castillo, 2009). De esta manera se definen desde pequeños a grandes pits en tamaño, que van paralelamente de bajos a altos precios en los metales de interés (Whittle D., 2011).

2.1.4 Diseño de fases

Whittle, D. (2011).; Open Pit Planning and Design. Con los resultados obtenidos en la etapa anterior, se comienza a diseñar el pit final considerando los parámetros geotécnico y rampas de acceso al tajo. El ancho de rampas es determinado en función a los equipos de acarreo.

En base a todas las características técnico-económicas que conlleva la construcción de rampas, un buen diseño y posterior gestión puede representar una influencia positiva en el historial de seguridad, la rentabilidad y el compromiso ambiental de una mina (Wetherelt & Van der Wielen, 2011). La rampa en la mina es un activo y debería, junto con los camiones de transporte que la utilizan, ser diseñada óptimamente y su mantenimiento rutinario ser manejado en consecuencia (Thompson R. , 2011).

Un buen diseño de la geometría de una rampa, debe cumplir con todas las especificaciones geométricas impuestas por geotecnia y, además entregar el mayor beneficio económico posible (Thompson R., 2011).

2.1.5 Plan de Producción

Whittle, D. (2011). Open Pit Planning and Design. El plan de producción define la secuencia de extracción de las fases, este proceso es iterativo con el diseño de mina.

En esta etapa se busca maximizar el Valor presente Neto, para ello se desarrolla diversos diseños en base a los pit anidados para determinar la mejor secuencia miento.

El Plan de producción nos permite saber cuándo, cuanto y donde se extrae las reservas definidas en una etapa anterior.

2.2 Marco conceptual

Banco:

Son cruciales en una operación ya que acomodan las áreas activas de perforación y tronadura (Wetherelt & Van der Wielen, 2011). Los bancos se pueden dividir en bancos de trabajo e inactivos (Hustrulid, Kuchta, & Martin, 2013).

Rampa:

Rutas que permite acceder al tajo y a los componentes de la Mina, estas rutas permiten el transporte de mineral y desmonte a los diferentes destinos.

Talud Global:

Es el cociente entre la altura total del tajo y la distancia horizontal entre el pie del primer banco y la cresta del último banco del tajo. Este cociente considera rampas, bermas, desacoples y canales.

Pit Shell:

Es la envolvente económica que define los bloques a minar, define los bloques que son mineral y desmonte.

Switchbacks:

Son plataformas que permiten cambiar la dirección de la rampa, estas plataformas permiten al camión poder girar y continuar su trayecto en la rampa.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Modelo de bloques

El modelo de bloques tiene unas dimensiones de 20x20x15, el cual tiene una cantidad de 5,372,730 de bloques, en la Tabla 1 se muestra las coordenadas y el número de bloques por eje.

Tabla 1

Dimensiones-Modelo de Bloque

| Coordenada | Min | Max | Dxyz | #Bloques |
|------------|---------|----------|------|----------|
| x | 72,610 | 76,610 | 20 | 201 |
| y | 477,910 | 483,290 | 20 | 270 |
| Z | 402.5 | 1,872.50 | 15 | 99 |

Nota: Elaboración propia

El modelo de bloques consta de variables numéricas y categorías, estas variables permiten describir y entender el yacimiento, entre ellas tenemos las leyes de los metales a extraer, densidad, tipo de mineral, recuperaciones metalúrgicas, incertidumbre geológica (Medido, indicado, inferido y potencial), entre otros. La Tabla 2 muestra las variables contenidas en el modelo.

Tabla 2

Variables Modelo de Bloques

| Variables | Precisión | Unidad | Descripción |
|-----------|-----------|--------|---|
| AG | 0.0001 | gr | Ley de Plata |
| AU | 0.001 | pbm | Ley de Oro |
| CAT | 1 | - | Categoría |
| CUT | 0.001 | % | Ley de Cobre |
| DENL | 0.001 | g/cm3 | Densidad |
| MOL | 0.01 | ppm | Ley de molibdeno |
| OREL | 1 | - | Tipo de mineral |
| RECCU | 0.001 | % | Recuperación de cobre |
| RECMO | 0.001 | % | Recuperación de molibdeno |
| RECAU | 0.001 | % | Recuperación de Oro |
| RECAG | 0.001 | % | Recuperación de Palta |
| %TOPO | 0.01 | % | Porcentaje de Roca |
| GEOT | 1 | - | Geotécnia |
| OSA | 0.01 | - | Ángulo Global |
| REVC | 0.01 | - | Valor del concentrado (\$/ton) |
| MCAF | 0 | - | Factor de incremento del costo de acarreo |

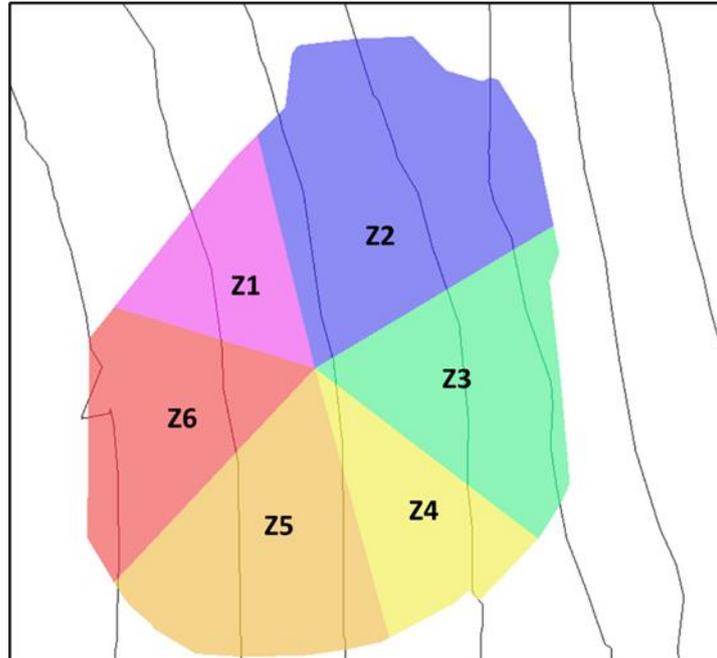
Nota: Elaboración propia

3.2 Sectores Geotécnico

El yacimiento minero está conformado por 6 sectores geotécnicos (ver Figura 1), cada sector cuenta con parámetros geotécnicos como: Ancho de Berma, Angulo inter-rampa y ángulo de talud. Estos parámetros están descritos en la Tabla 3

Figura 1

Sectores Geotécnicos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3

Parámetros Geotécnicos

| Zona | Altura(mt) | BFA (°) | Ancho Berma (mt) | IRA (°) |
|------|------------|---------|------------------|---------|
| 1 | 30 | 70 | 18 | 46.1 |
| 2 | 30 | 70 | 20 | 44.1 |
| 3 | 30 | 65 | 16 | 45 |
| 4 | 15 | 67 | 8 | 46.2 |
| 5 | 15 | 65 | 7 | 47 |
| 6 | 30 | 70 | 20 | 44.1 |

Nota: Elaboración propia

3.3 Parámetros Económicos

Los parámetros económicos permiten valorizar el modelo de bloques para así ser evaluados si son considerados como mineral o desmonte, estos parámetros esta descritos en la en Tabla 4 y Tabla 5

Tabla 4*Precio de los metales*

| Price | Valor | Unidades |
|--------------|--------------|-----------------|
| Cu Price | 3.24 | \$/lb |
| Mo price | 9.49 | \$/lb |
| Au Price | 1,346.06 | \$/oz |
| Ag Price | 16.82 | \$/oz |

Nota: Elaboración propia

Tabla 5*Costos Mina y Proceso*

| Cost | Valor | Unidades |
|------------------------|--------------|-----------------|
| Costo Mina | 1.47 | \$/ton |
| Costo de Procesamiento | 8.00 | \$/ton |
| Costo de venta Cu | 0.45 | \$/lb |
| Costo de venta Mo | 1.84 | \$/lb |
| G&A | 2.00 | \$/ton |
| Factor pagable Ag | 0.90 | |
| Factor pagable Au | 0.90 | |
| Factor pagable Cu | 0.96 | |
| Factor pagable Mo | 0.97 | |
| Costo de remanejo | 0.59 | \$/ton |

Nota: Elaboración propia

3.4 Definición de escenarios

Se desarrollaron dos escenarios que maximizan el valor actual neto del proyecto minero. Ambos casos consideran la mitología tradicional Pit by Pit, y la teoría de Lane que maximiza el valor del proyecto en función a la ley de corte variable. La selección de los pit Shell para el diseño de fases es el mismo para ambos casos.

El primer escenario, denominado “caso base”, se desarrolla utilizando técnicas tradicionales de diseño para el pit final y las fases de minado. En este enfoque, el objetivo principal es extraer el mineral, sin considerar la cantidad de desmonte necesario para su extracción.

El segundo escenario se denomina “Caso Rediseño”. En este caso, el diseño del pit final y las fases de minado se desarrollaron utilizando técnicas avanzadas basadas en la experiencia, conocidas como el sistema de rampas en paralelo. Este sistema consiste en diseñar el pit final con rampas en paralelo para maximizar la recuperación del mineral mientras se minimiza el volumen de desmonte necesario para su extracción.

3.5 Caso Base

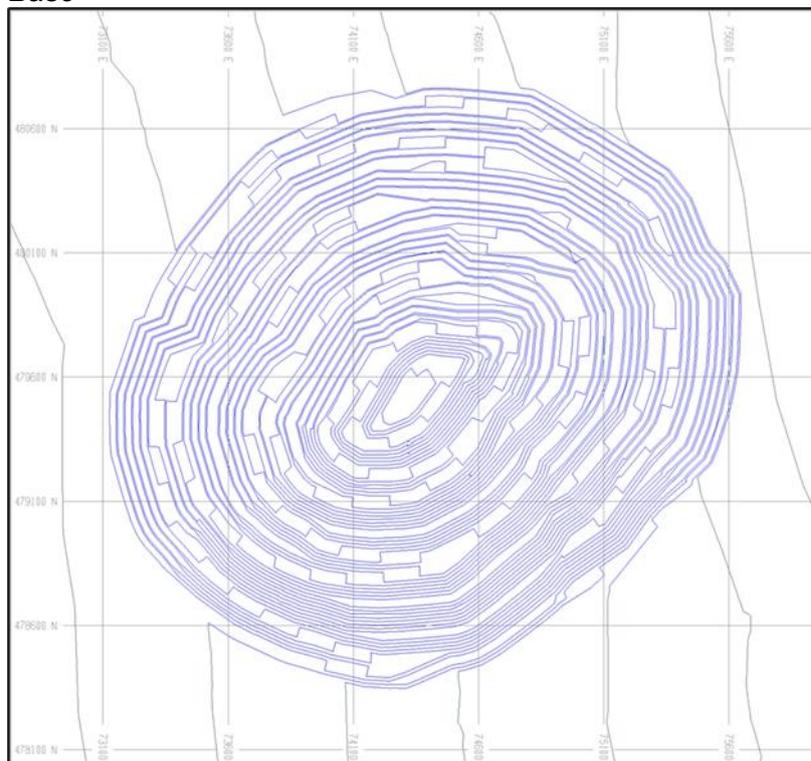
3.5.1 Diseño Pit final y fases

Como criterio de diseño, se estableció que cada fase de minado utilizará rampas independientes. Este enfoque genera un número considerable de "switchbacks" en todas las paredes del tajo (ver ya que no aprovecha las rampas desarrolladas en fases anteriores. Esto incrementa el volumen de material extraído, debido a que cada "switchback" disminuye el ángulo global del tajo, lo que a su vez implica una mayor cantidad de desmonte necesario para acceder a todo el mineral.

Figura 2), ya que no aprovecha las rampas desarrolladas en fases anteriores. Esto incrementa el volumen de material extraído, debido a que cada "switchback" disminuye el ángulo global del tajo, lo que a su vez implica una mayor cantidad de desmonte necesario para acceder a todo el mineral.

Figura 2

Pit final Caso Base

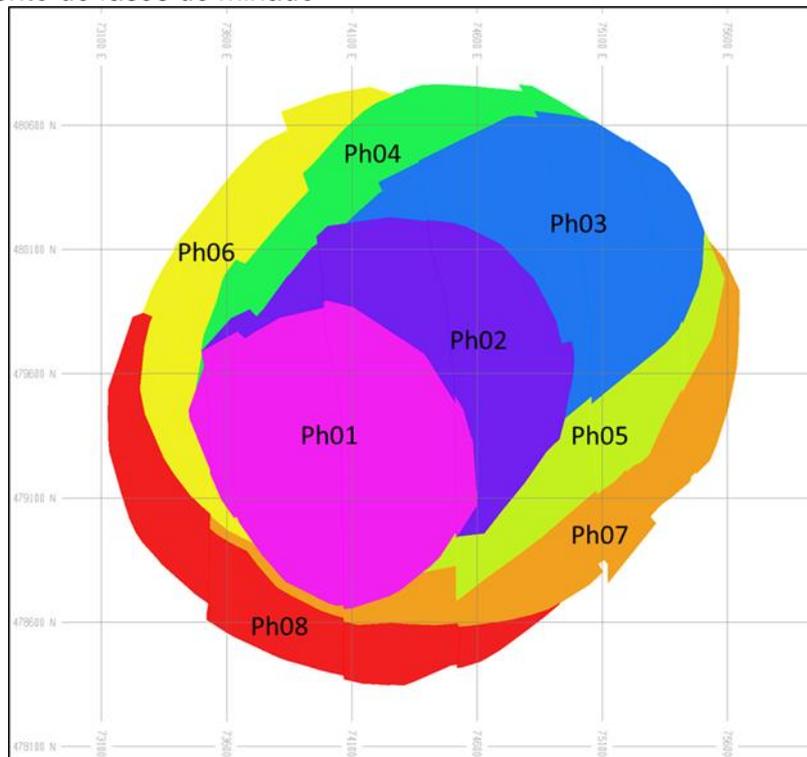


Fuente: Elaboración propia

La Figura 3 se muestra las fases de minado, en total hay 8 fases, cada fase tiene su propia rampa de acceso.

Figura 3

Secuenciamiento de fases de minado



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6 muestra la cantidad total de mineral y sus respectivas leyes, la cantidad total de desmonte y roca total por fase, así mismo muestra el valor de las fases. En total se tiene 1,015,452 kton de mineral con una ley promedio de 0.55 de Cu %, 165 Mo ppm, 34.9 Au ppb y 1.9 Ag gr, con un total de desmonte de 2,323, 001 kton y un total de roca por minar de 3,338,453 kton.

Tabla 6

Cubicación de Fases

| Fases | Ore | | | | | Waste Kton | Valor \$/t ore | Total Kton | Stripping Ratio |
|-------|-----------|------|--------|--------|-------|---------------|-------------------|---------------|--------------------|
| | Kton | Cu % | Mo ppm | Au ppb | Ag gr | | | | |
| CT01 | 165,993 | 0.71 | 198 | 47.3 | 1.7 | 218,112 | 37.30 | 384,105 | 1.31 |
| CT02 | 150,692 | 0.50 | 174 | 33.8 | 1.5 | 194,658 | 24.94 | 345,351 | 1.29 |
| CT03 | 158,936 | 0.56 | 113 | 28.7 | 2.3 | 333,464 | 26.40 | 492,400 | 2.10 |
| CT04 | 66,310 | 0.54 | 171 | 26.4 | 2.2 | 208,377 | 24.26 | 274,687 | 3.14 |
| CT05 | 99,179 | 0.59 | 131 | 36.2 | 2.0 | 240,173 | 27.18 | 339,352 | 2.42 |
| CT06 | 86,226 | 0.46 | 235 | 26.9 | 1.9 | 318,062 | 19.79 | 404,288 | 3.69 |
| CT07 | 129,169 | 0.56 | 144 | 34.9 | 1.8 | 394,634 | 24.57 | 523,804 | 3.06 |
| CT08 | 158,946 | 0.43 | 171 | 36.4 | 1.5 | 415,520 | 18.95 | 574,467 | 2.61 |
| Total | 1,015,452 | 0.55 | 165 | 34.9 | 1.9 | 2,323,001 | 25.94 | 3,338,453 | 2.29 |

Nota: Elaboración propia

3.5.2 Plan de Producción

El plan de producción del Caso Base considera un desbroce en los años 2024 y 2025, a su vez considera un Ramp-up de la chancadora que inicia con una capacidad de procesamiento de 25 Mton/year en el año 2026, 30 Mton/year en el año 2027, 35 Mton/year en el año 2028, hasta llegar hasta una capacidad de procesamiento de 40 Mton/year. La capacidad máxima de carguío es de 150 Mton/year.

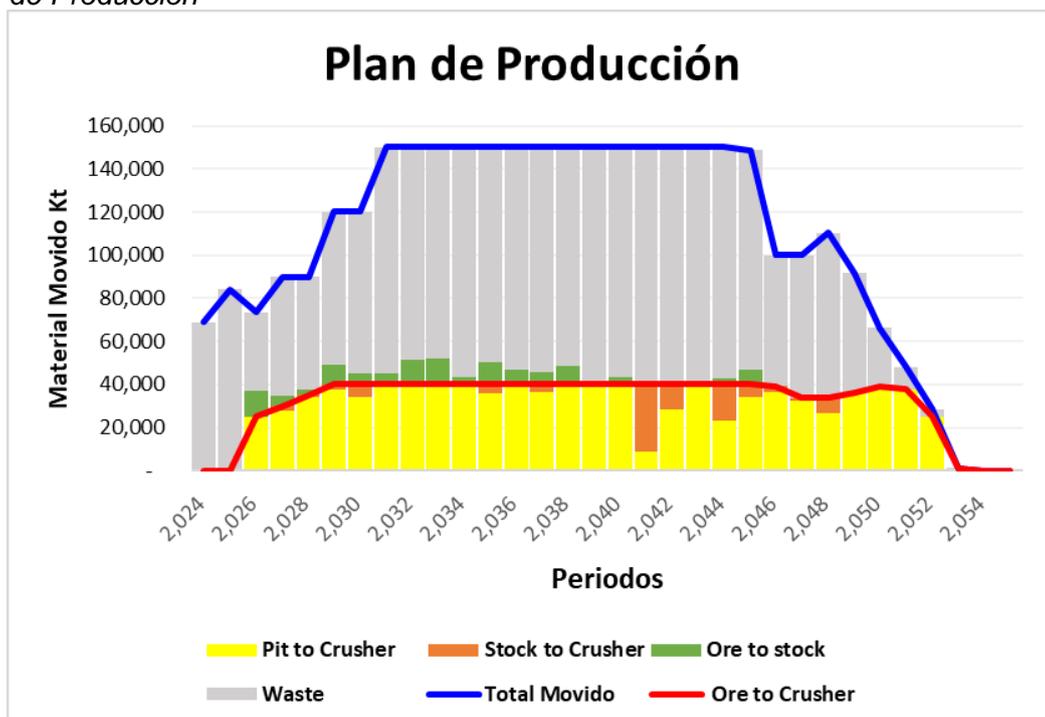
El plan de producción del caso base, contempla:

- Movimiento total (Minado +Remanejo): 3,441 Mton
- Minado Total: 3,338 Mton
- Mineral Procesado: 1,015 Mt con 0.55 Cu%
- Producción de Cobre: 4,745 KtonCu
- Desmante total: 2,314 Mton

La Figura 4 muestra el plan de producción por año, en los primeros años la capacidad máxima de carguío es de 90 Mton hasta el año 2028, incrementa hasta 120 Mton hasta el año 2030 y 150 Mton hasta el fin de la vida de la mina.

Figura 4

Plan de Producción

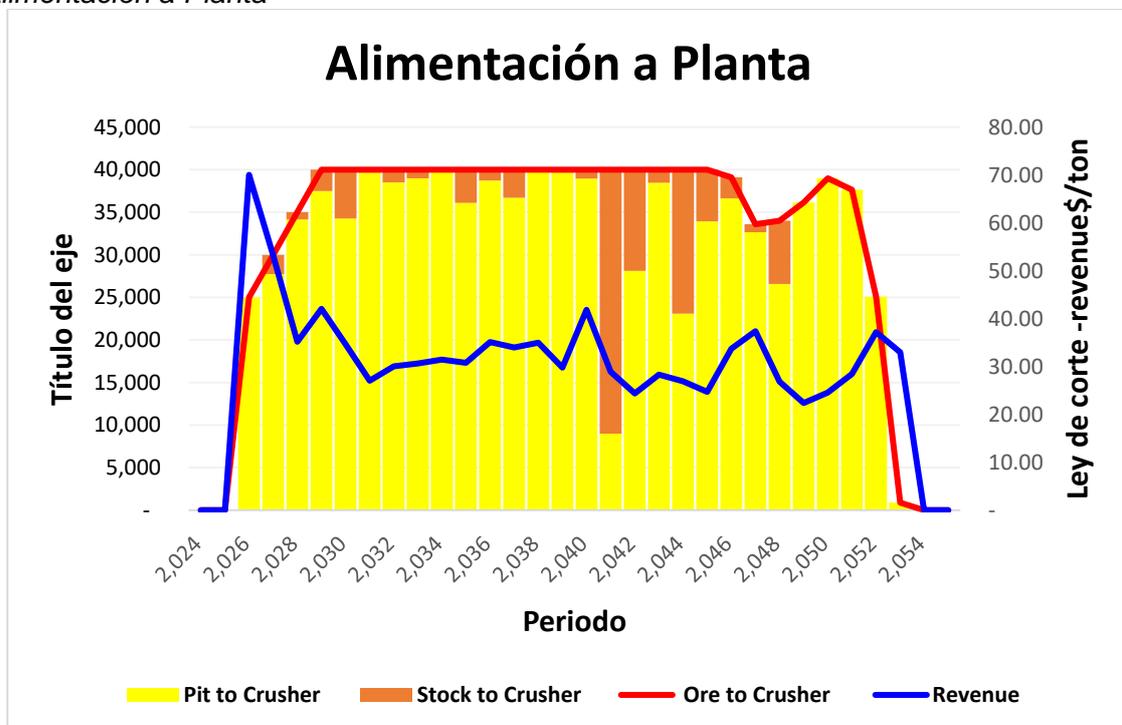


Fuente: Elaboración propia

La Figura 5 muestra el mineral enviado a la planta, muestra el comportamiento de la ley de cobre por año. En los primeros años se alimenta al proceso con las mejores leyes, dejando las bajas leyes para los últimos años. Se observa en los años 2042, 2043 y 2045 son críticos debido a que no se tiene suficiente mineral disponible en el tajo, esto conlleva a remanear mineral de los stocks lo cual genera un sobre costo por el remanejo, a su vez se tiene un riesgo alto de no poder enviar mineral en estos periodos, cualquier retraso de las fases hará que no se pueda procesar a máxima capacidad la planta, esto sucede en los años 2047,2048 y 2049.

Figura 5

Alimentación a Planta

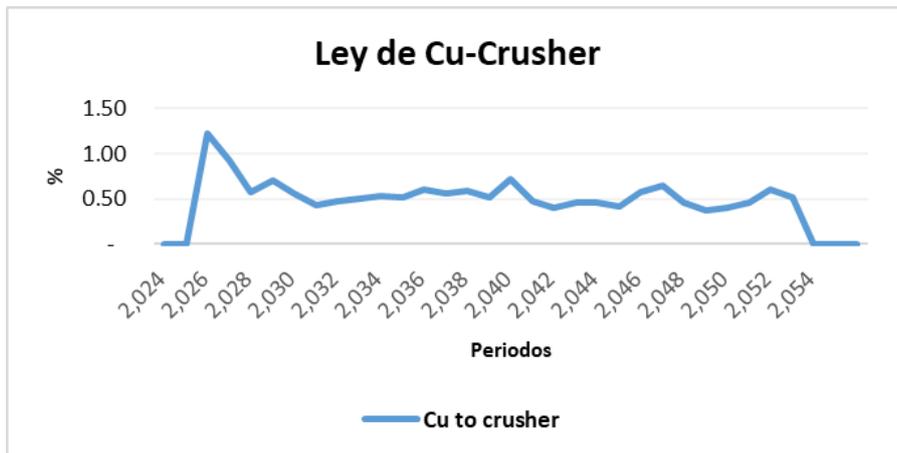


Fuente: Elaboración propia

La Figura 6 muestra la ley de Cobre enviado al proceso por año, Figura 7 muestra la ley de molibdeno enviado al proceso por año, Figura 8 muestra la ley del Oro enviado a al proceso por año, Figura 9 muestra la ley de Plata enviado al proceso por año.

Figura 6

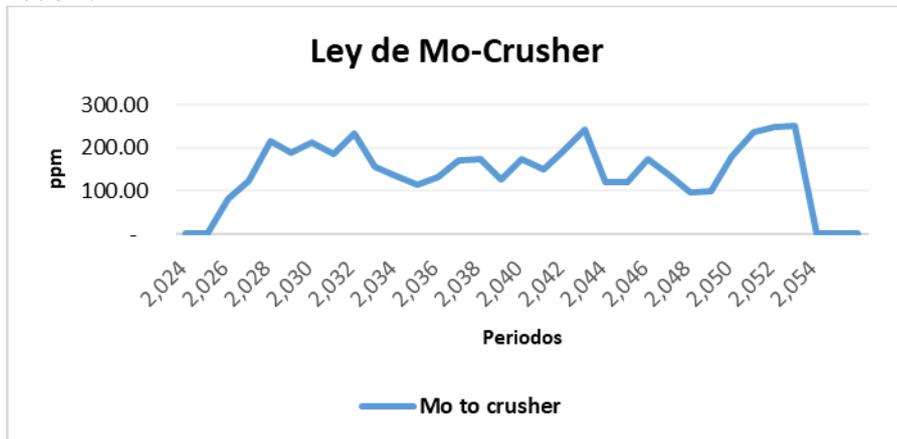
Ley Cobre



Fuente: Elaboración propia

Figura 7

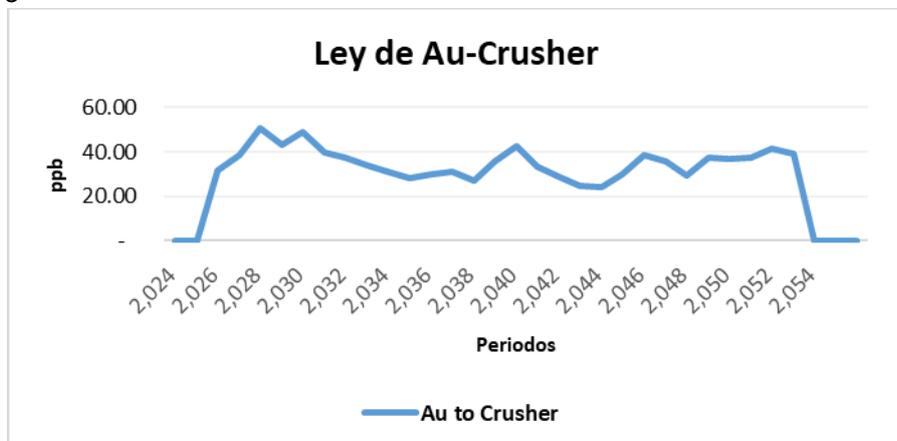
Ley de Molibdeno



Fuente: Elaboración propia

Figura 8

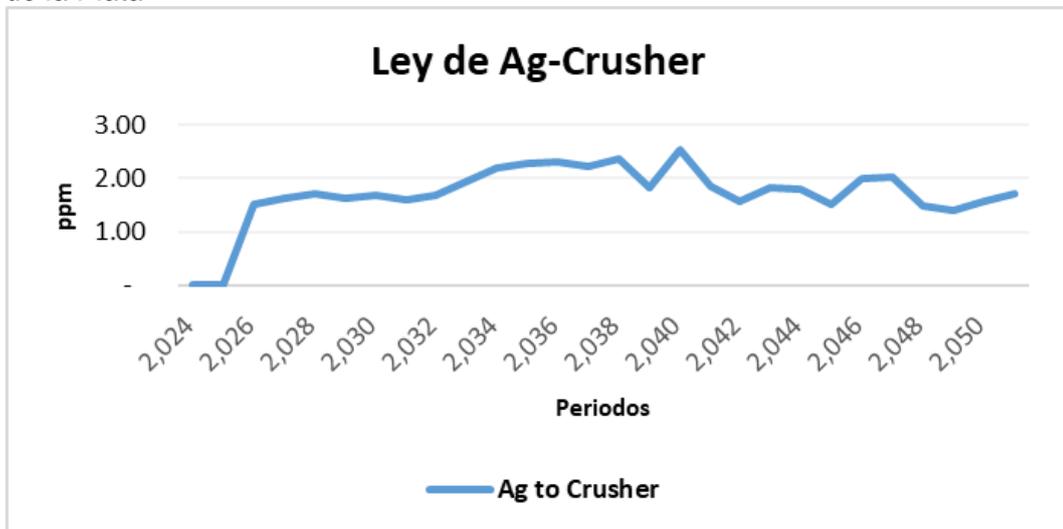
Ley del Oro



Fuente: Elaboración propia

Figura 9

Ley de la Plata



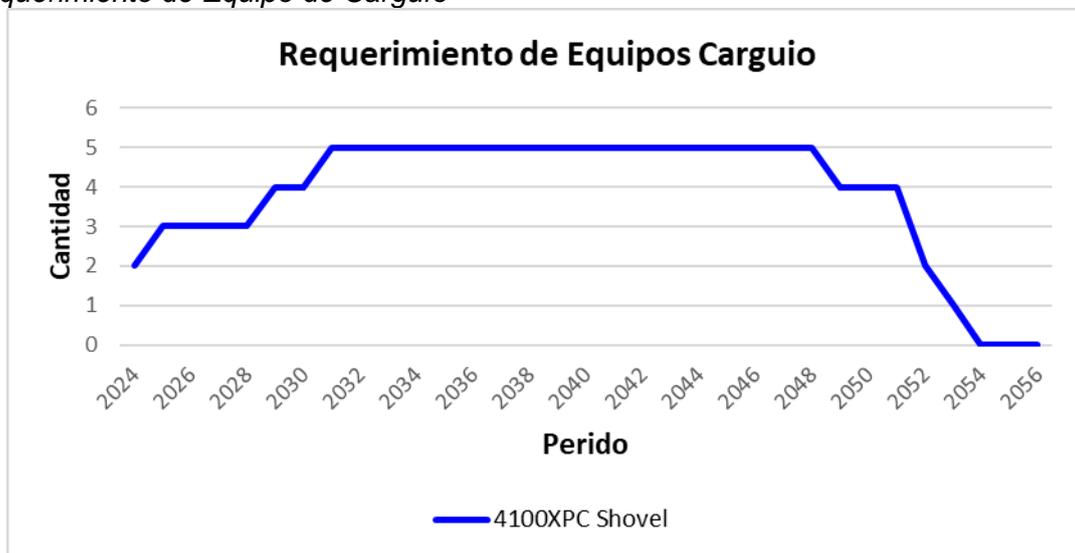
Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Requerimiento de equipos mineros

3.5.3.1 Equipos Carguío, La Figura 10 muestra la cantidad de equipos requeridos para el plan de producción, la pala utilizada para la operación es 4100XPC.

Figura 10

Requerimiento de Equipo de Carguío

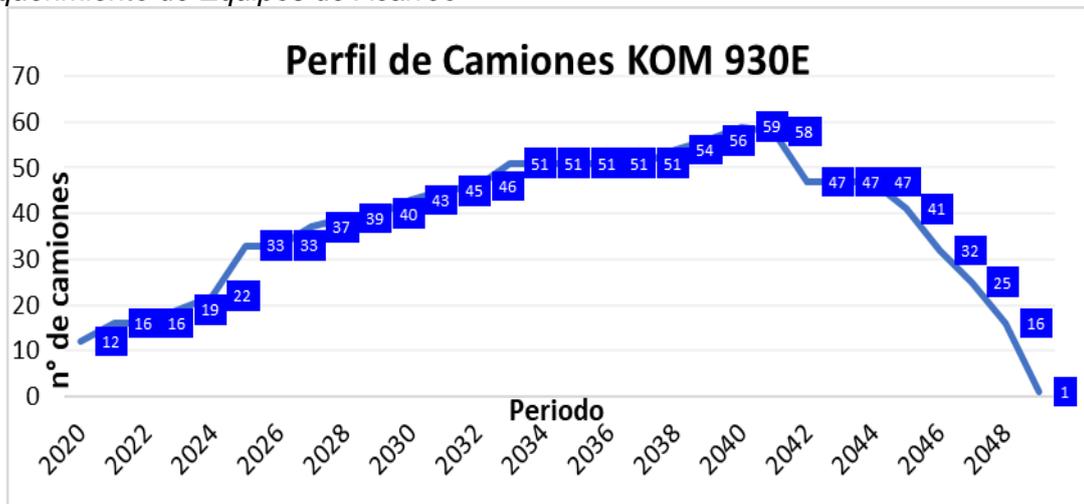


Fuente: Elaboración propia

3.5.3.2 Equipos de Acarreo. La Figura 11 muestra la cantidad de equipos requeridos para el plan de producción, el camión utilizado para la operación es KOM 930E.

Figura 11

Requerimiento de Equipos de Acarreo

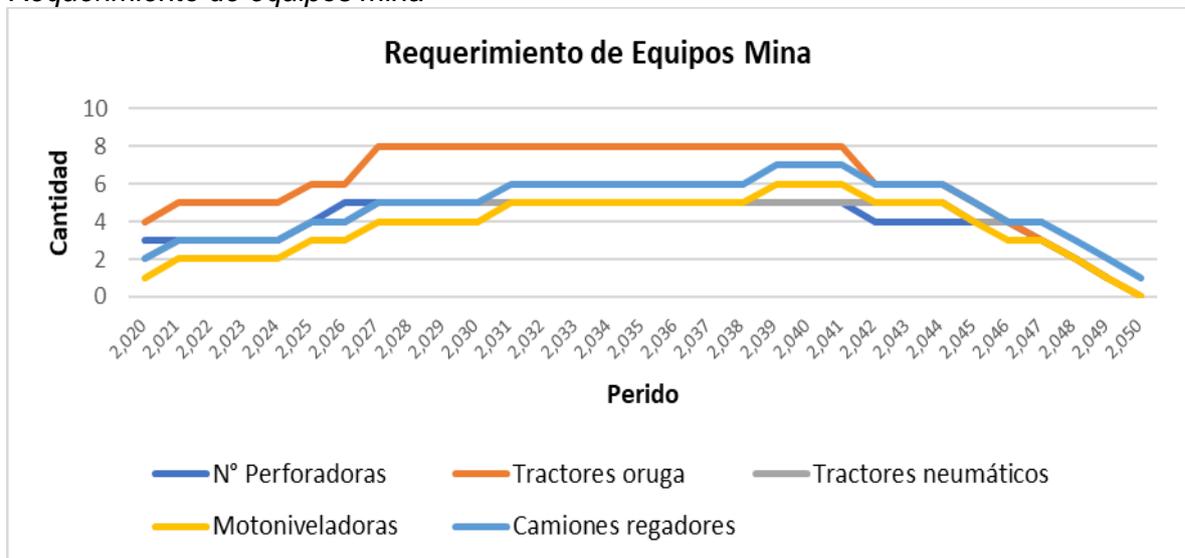


Fuente: Elaboración propia

3.5.3.3 Equipos de Mina. La Figura 12 muestra la cantidad de equipos requeridos para el plan de producción.

Figura 12

Requerimiento de equipos mina



Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Evaluación Económica - Financiera

La Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 muestra el flujo de caja del proyecto minero. Muestra la estimación de los Renueves, costos operativos, costos de sostenimientos, depreciación, costo de cierre, etc. El Valor Presente Neto del proyecto es 2,492 M\$ con una tasa de 10%.

Tabla 7*Flujo de Caja 2024-2033*

| Cash Flows | | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Total Revenues | US\$ million | - | - | 1,527 | 1,394 | 1,084 | 1,473 | 1,221 | 953 | 1,059 | 1,077 |
| Total Operating Costs | US\$ million | (140) | (163) | (361) | (428) | (484) | (586) | (590) | (646) | (651) | (654) |
| Total Growth & Sustaining Capital | US\$ million | (266) | (167) | (125) | (202) | (188) | (354) | (71) | (196) | (49) | (18) |
| Financial Depreciation | US\$ million | - | (11) | (14) | (14) | (15) | (16) | (23) | (25) | (29) | (31) |
| Closure Costs | US\$ million | | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Cost | US\$ million | (407) | (329) | (486) | (630) | (672) | (940) | (661) | (842) | (701) | (671) |
| Royaltis | US\$ million | | | 925 | 675 | 357 | 465 | 483 | 77 | 297 | 337 |
| Income tax | US\$ million | | | 786 | 574 | 303 | 396 | 411 | 66 | 253 | 287 |
| Financial Depreciation | US\$ million | (407) | (319) | 800 | 588 | 319 | 412 | 434 | 91 | 281 | 318 |
| Net Cash Flows | US\$ million | (407) | (319) | 800 | 588 | 319 | 412 | 434 | 91 | 281 | 318 |
| NPV | | (407) | (290) | 661 | 442 | 218 | 256 | 245 | 47 | 131 | 135 |

Nota: Elaboración propia

Tabla 8*Flujo de caja 2034-2043*

| Cash Flows - real | | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 | 2043 |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Total Revenues | US\$ million | 1,105 | 1,082 | 1,231 | 1,193 | 1,230 | 1,048 | 1,473 | 1,017 | 857 | 993 |
| Total Operating Costs | US\$ million | (656) | (664) | (675) | (674) | (692) | (696) | (695) | (668) | (698) | (709) |
| Total Growth & Sustaining Capital | US\$ million | (43) | (136) | (18) | (92) | (12) | (66) | (29) | (3) | (33) | (138) |
| Financial Depreciation | US\$ million | (31) | (33) | (34) | (34) | (40) | (40) | (33) | (32) | (32) | (33) |
| Closure Costs | US\$ million | - | - | - | - | - | - | - | - | (2.96) | (20.47) |
| Total Cost | US\$ million | (699) | (800) | (693) | (766) | (704) | (762) | (724) | (672) | (734) | (868) |
| Royaltis | US\$ million | 337 | 224 | 454 | 354 | 438 | 222 | 644 | 282 | 82 | 83 |
| Income tax | US\$ million | 287 | 190 | 386 | 300 | 373 | 189 | 547 | 240 | 70 | 71 |
| Financial Depreciation | US\$ million | 318 | 223 | 420 | 335 | 412 | 228 | 581 | 271 | 102 | 103 |
| Net Cash Flows | US\$ million | 318 | 223 | 420 | 335 | 412 | 228 | 581 | 271 | 102 | 103 |
| NPV | | 123 | 78 | 134 | 97 | 109 | 55 | 126 | 54 | 19 | 123 |

Nota: Elaboración propia

Tabla 9*Flujo de caja 2044-2053*

| Cash Flows - real | | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 | 2051 | 2052 | 2053 |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Total Revenues | US\$ million | 942 | 869 | 1,163 | 1,104 | 797 | 708 | 846 | 950 | 826 | 26 |
| Total Operating Costs | US\$ million | (690) | (709) | (616) | (559) | (569) | (567) | (553) | (506) | (326) | (28) |
| Total Growth & Sustaining Capital | US\$ million | (58) | (20) | (29) | (31) | (30) | (33) | (26) | (28) | (26) | (26) |
| Financial Depreciation | US\$ million | (34) | (30) | (29) | (27) | (27) | (29) | (29) | (30) | (32) | (26) |
| Closure Costs | US\$ million | (22.14) | (21.52) | (20.83) | (16.32) | (12.42) | (10.19) | (14.83) | (10.19) | (14.83) | (13.04) |
| Total Cost | US\$ million | (769) | (751) | (666) | (606) | (611) | (611) | (594) | (544) | (367) | (67) |
| Royaltis | US\$ million | 125 | 79 | 421 | 424 | 143 | 62 | 200 | 338 | 385 | (61) |
| Income tax | US\$ million | 106 | 67 | 358 | 360 | 122 | 52 | 170 | 288 | 327 | (51) |
| Financial Depreciation | US\$ million | 140 | 97 | 387 | 388 | 149 | 81 | 199 | 318 | 359 | (25) |
| Net Cash Flows | US\$ million | 140 | 97 | 387 | 388 | 149 | 81 | 199 | 316 | 359 | (25) |
| NPV | | 23 | 13 | 47 | 43 | 14 | 7 | 17 | 24 | 25 | (2) |

Nota: Elaboración propia

3.6 Caso Rediseño

3.6.1 Diseño Pit final y fases

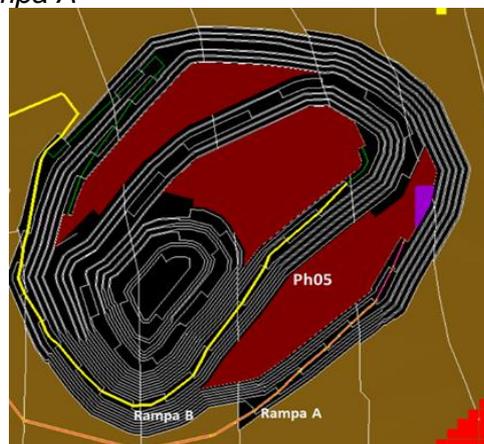
Como criterio de diseño, se consideró minimizar el número de switchbacks para extraer todo el mineral con la menor cantidad de desmonte posible. Para lograr esto, cada fase de minado aprovechará las rampas construidas en fases anteriores. El sistema que permite utilizar las rampas existentes es el Sistema de Rampas en Paralelo.

3.6.1.1 Sistema de Rampas en paralelo. Para implementar el sistema de rampas en paralelo, es necesario que las fases de minado tengan una longitud mínima de 1.5 km. Esta longitud permite utilizar una sola rampa para minar la fase hasta que pueda conectarse con otras rampas existentes. La Figura 13 ilustra cómo la fase 05 se mina utilizando la rampa A. A medida que se profundiza el minado, la rampa A se conecta con otra rampa existente, justo cuando la rampa B se conecta con la fase, lo que permite continuar con el minado de la fase 05, la Figura 14 muestra la conexión con la rampa B.

Esta técnica de diseño ayuda a minimizar el desmonte al evitar la necesidad de switchbacks para continuar el minado. Además, un parámetro geotécnico importante es que cada 150 metros de altura se deben dejar desacoples geotécnicos de 30 metros de ancho. Sin embargo, al implementar el sistema de rampas en paralelo, no es necesario dejar estos desacoples, ya que las rampas en paralelo están separadas por una distancia de 150 mts. La Fig. 15 muestra el Pit final implementando el sistema de rampas en paralelo

Figura 13

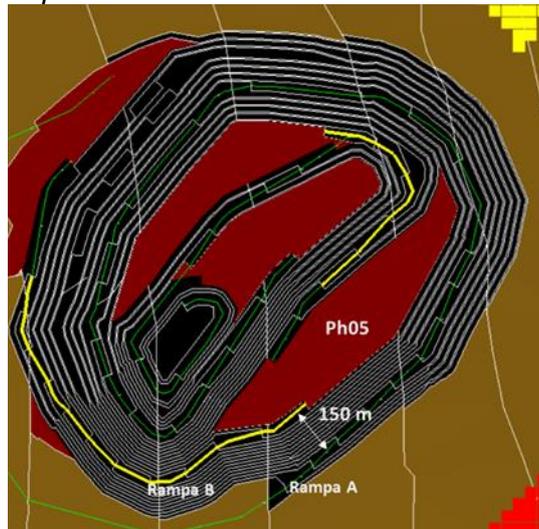
Rampas en paralelo - Rampa A



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14

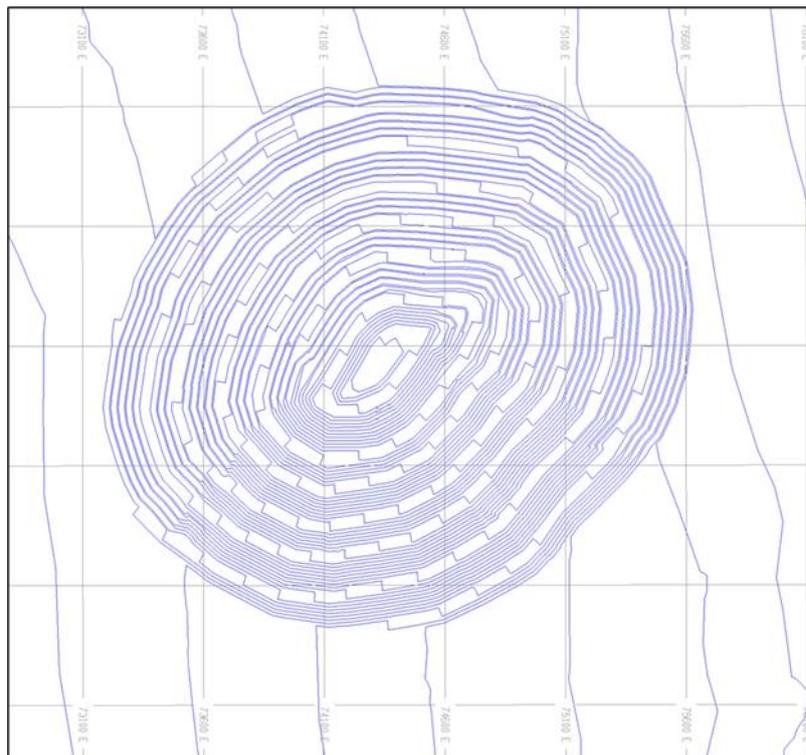
Rampas en paralelo - Rampa B



Fuente: Elaboración propia

Figura 15

Pit Final



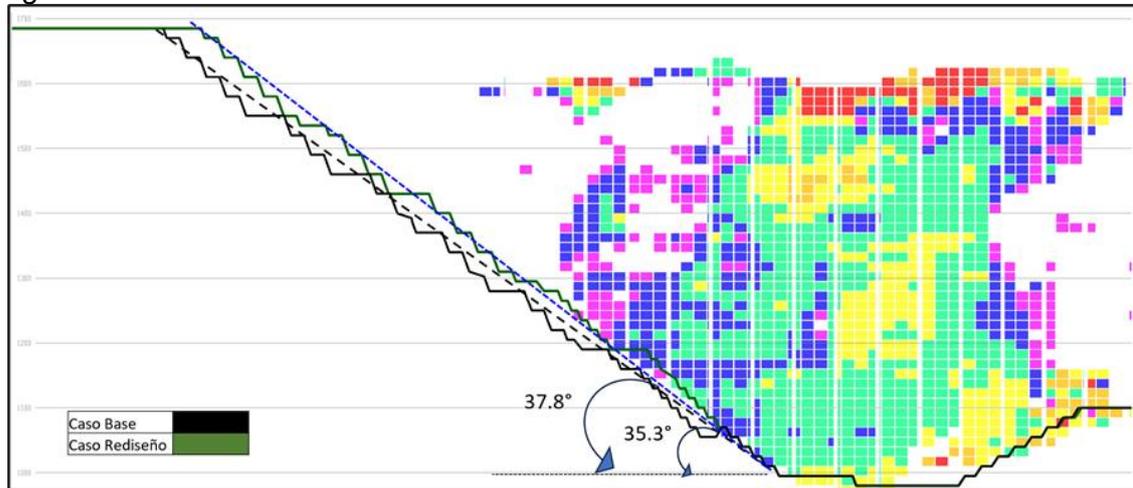
Fuente: Elaboración propia

La Figura 16 y Figura 17 ilustra el ángulo global del talud en ambos casos. En el caso base, el ángulo del talud es de 35.3° , mientras que en el caso de rediseño alcanza 37.8° . Este incremento en el ángulo se debe al sistema de rampas en paralelo, que

minimiza la necesidad de switchbacks. Como resultado, el ángulo global del talud es mayor, lo que contribuye a reducir la cantidad de desmonte necesario para la extracción.

Figura 16

Ángulo de talud

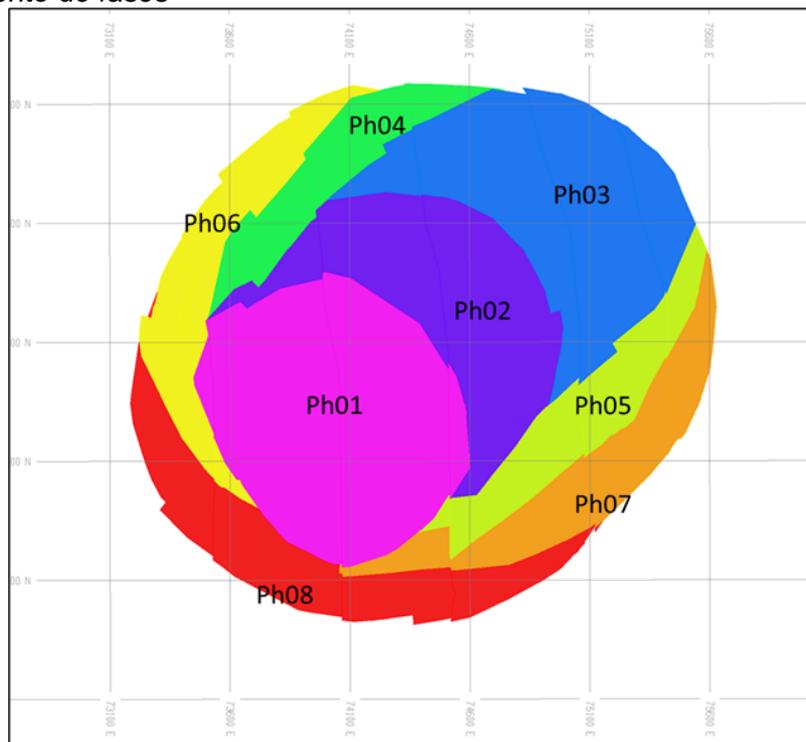


Fuente: Elaboración propia

La Figura 17 muestra las fases de minado utilizando el sistema de rampas en paralelo. En total, se han diseñado 8 fases, igual que en el caso base, ya que el cambio se realizó únicamente en el diseño, sin alterar la optimización del minado.

Figura 17

Secuenciamiento de fases



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 10 muestra la cantidad total de mineral y sus respectivas leyes, la cantidad total de desmonte y roca total por fase, así mismo muestra el valor de las fases. En total se tiene 998,618 Kton de mineral con una ley promedio de 0.55 de Cu %, 165 Mo ppm, 35.1 Au ppb y 1.9 Ag gr, con un total de desmonte de 2,188,146 kton y un total de roca por minar de 3,186,764 kton.

Tabla 10

Cubicación de fases- Caso Rediseño

| Fases | Ore | | | | | Waste Kton | Valor \$/t ore | Total Kton | Stripping Ratio |
|-------|---------|------|--------|--------|-------|---------------|-------------------|---------------|--------------------|
| | Kton | Cu % | Mo ppm | Au ppb | Ag gr | | | | |
| CT01 | 165,993 | 0.71 | 198 | 47.3 | 1.7 | 218,112 | 37.30 | 384,105 | 1.31 |
| CT02 | 155,199 | 0.50 | 176 | 34.4 | 1.5 | 192,580 | 25.09 | 347,779 | 1.24 |
| CT03 | 161,244 | 0.56 | 116 | 28.9 | 2.3 | 336,022 | 26.35 | 497,267 | 2.08 |
| CT04 | 66,533 | 0.53 | 182 | 27.1 | 2.2 | 179,194 | 24.59 | 245,727 | 2.69 |
| CT05 | 114,480 | 0.59 | 123 | 35.2 | 2.0 | 275,632 | 27.38 | 390,113 | 2.41 |
| CT06 | 85,622 | 0.46 | 231 | 26.9 | 1.9 | 295,580 | 20.03 | 381,202 | 3.45 |
| CT07 | 100,028 | 0.57 | 142 | 34.7 | 1.8 | 350,661 | 24.37 | 450,688 | 3.51 |
| CT08 | 149,519 | 0.43 | 174 | 37.7 | 1.6 | 340,365 | 19.63 | 489,884 | 2.28 |
| Total | 998,618 | 0.55 | 165 | 35.1 | 1.9 | 2,188,146 | 26.23 | 3,186,764 | 2.19 |

Nota: Elaboración propia

3.6.2 Plan de Producción

El plan de producción del Caso Rediseño considera, en los dos primeros años, un desbroce en los años 2024 y 2025, a su vez considera un Ramp-up de la chancadora que inicia con una capacidad de procesamiento de 25 Mton/year en el año 2026 , 30 Mton/year en el año 2027, 35 Mton/year en el año 2028, hasta llegar hasta una capacidad de procesamiento de 40 Mton/year. La capacidad máxima de carguío es de 150 Mton/year.

El plan de producción del caso rediseño, contempla:

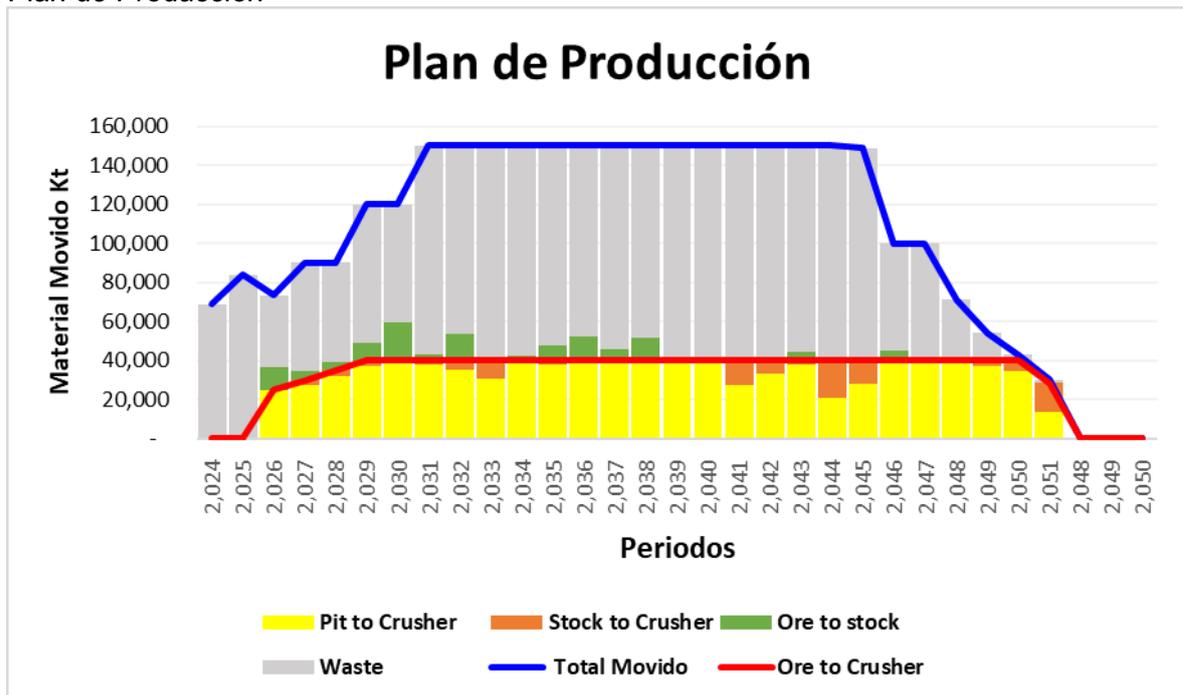
- Movimiento total (Minado +Remanejo): 3,294 Mton
- Minado Total: 3,187 Mton
- Mineral Procesado: 1,015 Mton con 0.55 Cu%

- Producción de Cobre: 4,813 KtonCu
- Desmante total: 2,173 Mton

La Figura 18 muestra el plan de producción por año, en los primeros años la capacidad máxima de carguío es de 90 Mton hasta el año 2028, incrementa hasta 120 Mton hasta el año 2030 y 150 Mton hasta el fin de la vida de la mina.

Figura 18

Plan de Producción



Fuente: Elaboración propia

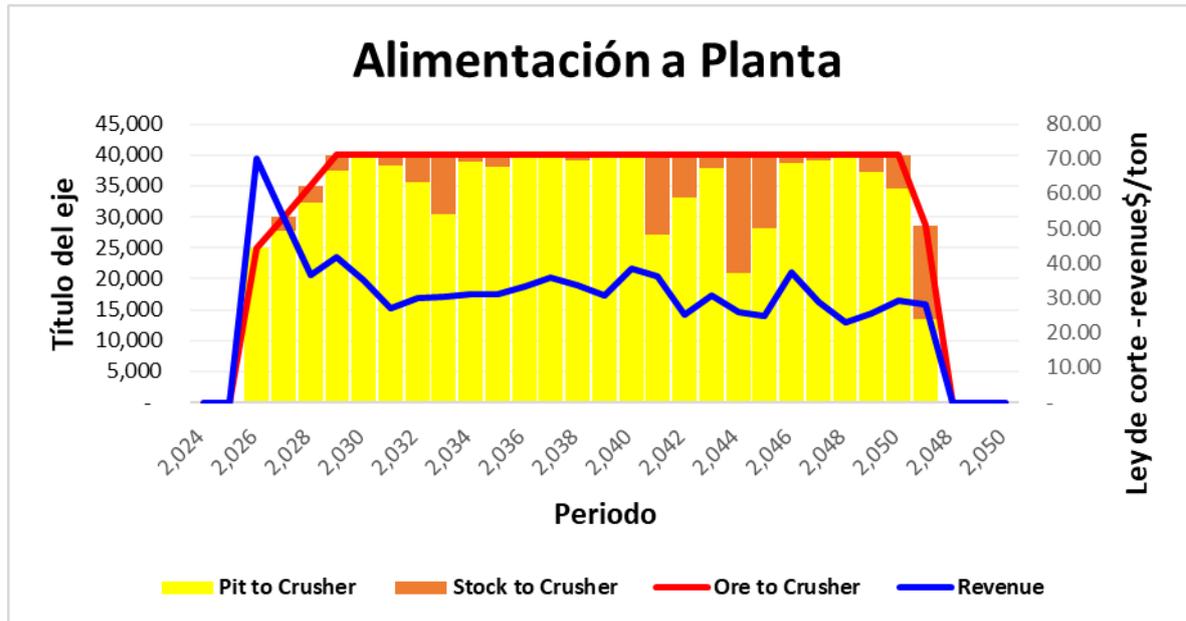
La Figura 19 muestra el mineral enviado a la planta, muestra el comportamiento de la ley de cobre por año.

En los primeros años se alimenta al proceso con las mejores leyes, dejando las bajas leyes para los últimos años.

Se observa en los años 2041y 2044 son críticos debido a que no se tiene suficiente mineral disponible en el tajo, esto conlleva a remanear mineral de los stocks lo cual genera un sobre costo por el remanejo.

Figura 19

Alimentación a Planta



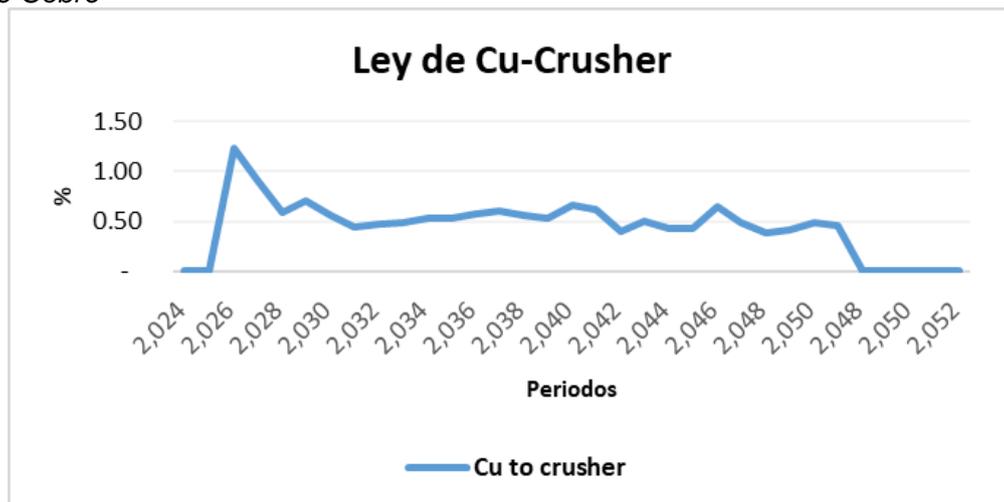
Fuente: Elaboración propia

La Figura 20 muestra la ley de Cobre enviado al proceso por año, Figura 21 muestra la ley de molibdeno enviado al proceso por año,

Figura 22 muestra la ley del Oro enviado a al proceso por año, Figura 23 muestra la ley de Plata enviado al proceso por año.

Figura 20

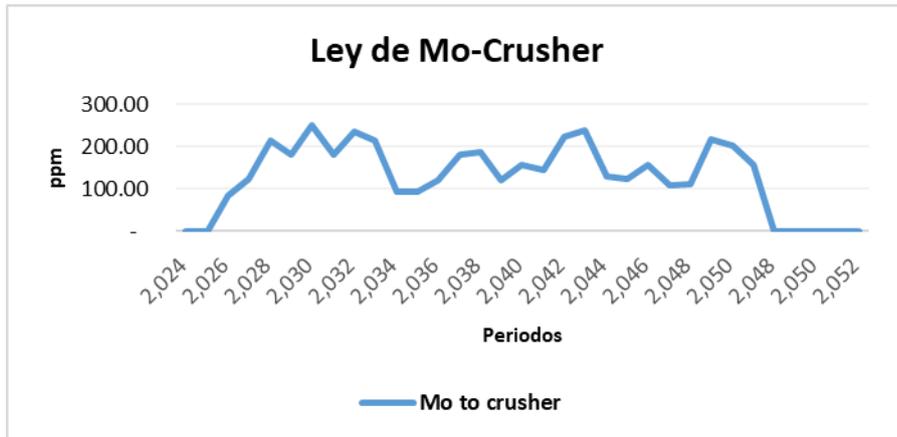
Ley de Cobre



Fuente: Elaboración propia

Figura 21

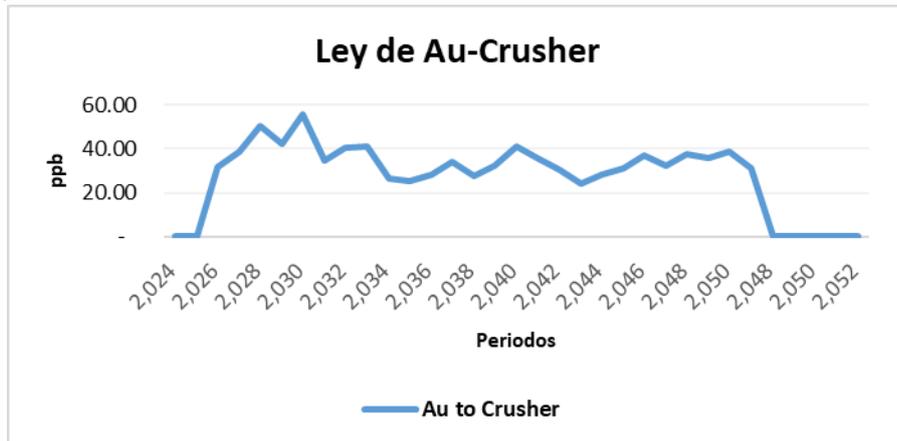
Ley de Molibdeno



Fuente: Elaboración propia

Figura 22

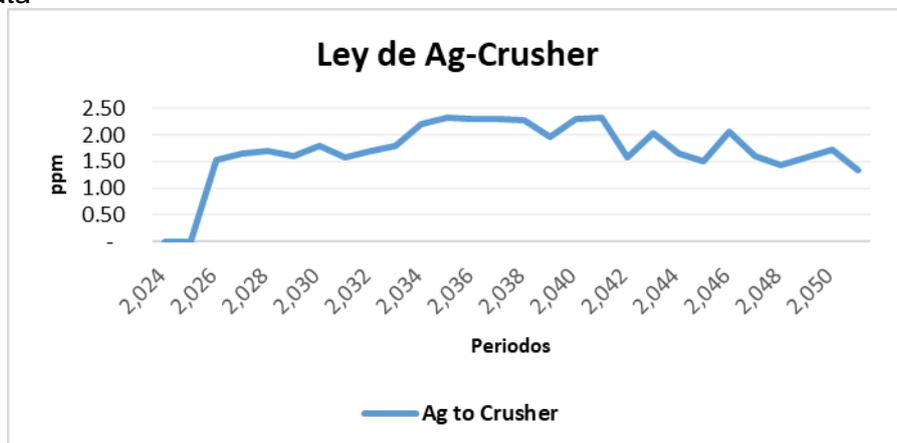
Ley de Oro



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Ley de Plata



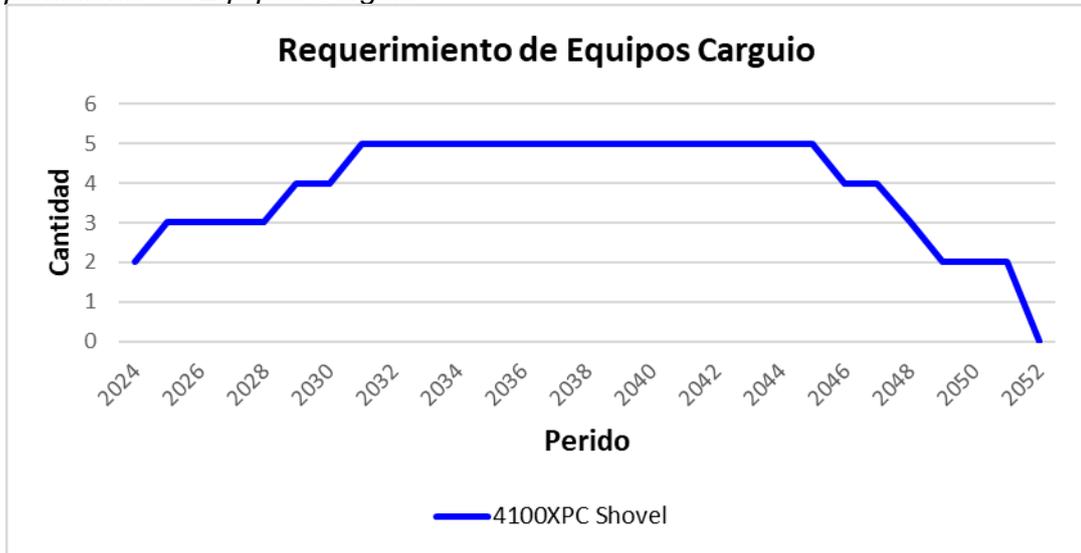
Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Requerimiento de equipos mineros

3.6.3.1 Equipos Carguío. La Figura 24 muestra la cantidad de equipos requeridos para el plan de producción, la pala utilizada para la operación es 4100XPC.

Figura 24

Requerimiento de Equipos Carguío



Fuente: Elaboración propia

3.6.3.2 Equipos de Acarreo. La Figura 25 muestra la cantidad de equipos requeridos para el plan de producción, el camión utilizado para la operación es KOM 930E.

Figura 25

Requerimiento de Equipos de acarreo

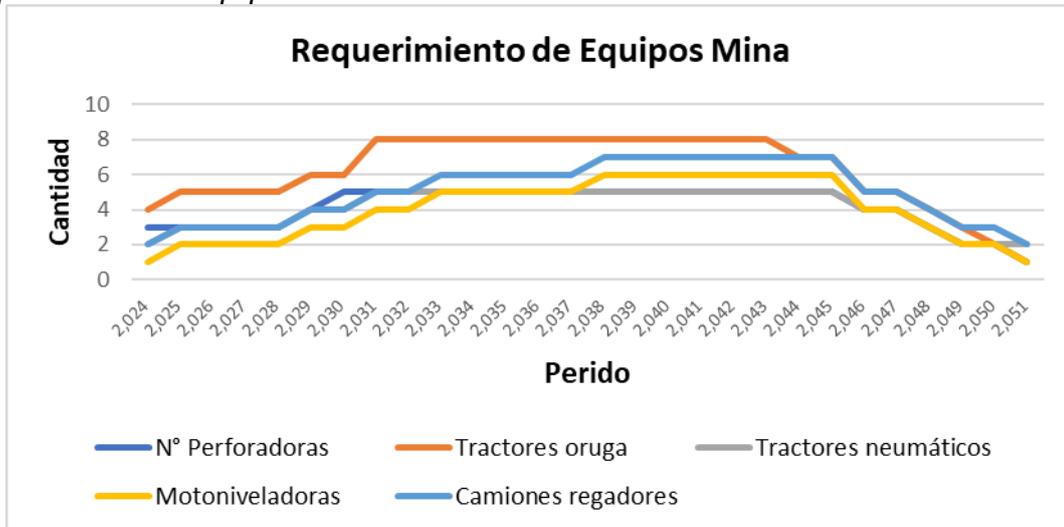


Fuente: Elaboración propia

3.6.3.3 Equipos de Mina. La Figura 26 muestra la cantidad de equipos requeridos para el plan de producción.

Figura 26

Requerimiento de Equipos Mina



Fuente: Elaboración propia

3.6.4 Evaluación Económica – Financiera

La Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 muestra el flujo de caja del proyecto minero. Muestra la estimación de los Renuevos, costos operativos, costos de sostenimientos, depreciación, costo de cierre, etc. El Valor Presente Neto del proyecto es 2,492 M\$ con una tasa de 10%.

Tabla 11*Flujo de caja 2024-2033*

| Cash Flows – real | | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 |
|------------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Total Revenues | US\$ million real | - | - | 1,527 | 1,394 | 1,126 | 1,469 | 1,244 | 952 | 1,065 | 1,065 |
| Total Operating Costs | US\$ million real | (140) | (163) | (361) | (428) | (482) | (586) | (602) | (639) | (649) | (656) |
| Total, Growth & Sustaining Capital | US\$ million real | (266) | (167) | (125) | (202) | (183) | (359) | (71) | (186) | (65) | (151) |
| Financial Depreciation | US\$ million real | - | (11) | (14) | (14) | (15) | (16) | (23) | (25) | (28) | (31) |
| Closure Costs | US\$ million real | | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Cost | US\$ million real | (407) | (329) | (486) | (630) | (664) | (945) | (673) | (824) | (715) | (807) |
| Royaltis | US\$ million real | | | 925 | 675 | 402 | 457 | 493 | 93 | 290 | 204 |
| Income tax | US\$ million real | | | 786 | 574 | 341 | 388 | 419 | 79 | 247 | 173 |
| Financial Depreciation | US\$ million real | | | 800 | 588 | 357 | 404 | 442 | 104 | 275 | 205 |
| Net Cash Flows | US\$ million real | (311) | (319) | 800 | 588 | 357 | 404 | 442 | 104 | 275 | 205 |
| NPV | | (311) | (290) | 661 | 442 | 244 | 251 | 250 | 53 | 128 | 87 |

Nota: Elaboración propia

Tabla 12*Flujo de caja 2034-2043*

| Cash Flows - real | | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 | 2043 |
|-----------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Total Revenues | US\$ million real | 1,086 | 1,096 | 1,175 | 1,236 | 1,184 | 1,086 | 1,349 | 1,279 | 886 | 1,075 |
| Total Operating Costs | US\$ million real | (664) | (669) | (689) | (677) | (710) | (706) | (712) | (703) | (708) | (713) |
| Total Growth & Sustaining Capital | US\$ million real | (27) | (24) | (44) | (65) | (135) | (63) | (29) | (3) | (17) | (23) |
| Financial Depreciation | US\$ million real | (34) | (34) | (35) | (37) | (40) | (42) | (35) | (34) | (34) | (34) |
| Closure Costs | US\$ million real | - | - | - | - | - | - | - | - | (2.96) | (20.47) |
| Total Cost | US\$ million real | (691) | (693) | (734) | (742) | (846) | (768) | (741) | (706) | (728) | (757) |
| Royaltis | US\$ million real | 325 | 331 | 366 | 436 | 268 | 248 | 516 | 485 | 111 | 256 |
| Income tax | US\$ million real | 277 | 281 | 311 | 371 | 228 | 211 | 439 | 413 | 95 | 218 |
| Financial Depreciation | US\$ million real | 311 | 316 | 346 | 408 | 268 | 252 | 474 | 446 | 129 | 251 |
| Net Cash Flows | US\$ million real | 311 | 316 | 346 | 408 | 268 | 252 | 474 | 446 | 129 | 251 |
| NPV | | 120 | 111 | 110 | 118 | 71 | 60 | 103 | 88 | 23 | 41 |

Nota: Elaboración propia

Tabla 13*Flujo de Caja 2044-2052*

| Cash Flows - real | | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 | 2051 | 2052 | 2053 |
|-----------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Total Revenues | US\$ million real | 906 | 879 | 1,312 | 1,007 | 810 | 910 | 1,039 | 703 | - | - |
| Total Operating Costs | US\$ million real | (684) | (697) | (627) | (614) | (561) | (527) | (504) | (347) | - | - |
| Total Growth & Sustaining Capital | US\$ million real | (54) | (25) | (3) | (11) | (0) | (1) | (0) | (1) | - | - |
| Financial Depreciation | US\$ million real | (34) | (30) | (29) | (26) | (23) | (21) | (21) | (21) | - | - |
| Closure Costs | US\$ million real | (22.14) | (21.52) | (20.83) | (16.32) | (12.42) | (10.19) | (14.83) | (13.04) | - | - |
| Total Cost | US\$ million real | (760) | (744) | (651) | (641) | (574) | (538) | (519) | (361) | - | - |
| Royaltis | US\$ million real | 101 | 95 | 569 | 305 | 192 | 316 | 449 | 289 | - | - |
| Income tax | US\$ million real | 86 | 81 | 483 | 259 | 163 | 268 | 381 | 246 | - | - |
| Financial Depreciation | US\$ million real | 120 | 110 | 513 | 285 | 186 | 290 | 402 | 266 | - | - |
| Net Cash Flows | US\$ million real | 120 | 110 | 513 | 285 | 186 | 290 | 402 | 266 | - | - |
| NPV | | 18 | 15 | 63 | 32 | 19 | 27 | 34 | 20 | - | - |

Nota: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Cubicación de fases

La Tabla 14 muestra la cantidad de mineral y desmote de cada caso, se puede observar que el caso rediseño tiene menos mineral (-16,835 kton) y menos desmote (-134,855 kton). Esta disminución de desmote ayudará a exponer el mineral en los últimos años, años donde el caso base no puede alimentar al proceso, debido a un alto desbroce.

Tabla 14

Comparativo - Cubicación de Fases

| Fases | Caso Rediseño | | | Caso Base | | | Diferencia | | |
|-------|---------------|-------|-----------|-----------|-------|-----------|------------|-------|-----------|
| | Ore | Waste | | Ore | Waste | | Ore | Waste | |
| | Kton | Cu % | Kton | Kton | Cu % | Kton | Kton | Cu % | Kton |
| CT01 | 165,993 | 0.71 | 218,112 | 165,993 | 0.71 | 218,112 | - | - | - |
| CT02 | 155,199 | 0.50 | 192,580 | 150,692 | 0.50 | 194,658 | 4,506 | 0.52 | - 2,078 |
| CT03 | 161,244 | 0.56 | 336,022 | 158,936 | 0.56 | 333,464 | 2,308 | 0.41 | 2,558 |
| CT04 | 66,533 | 0.53 | 179,194 | 66,310 | 0.54 | 208,377 | 223 | 0.65 | - 29,183 |
| CT05 | 114,480 | 0.59 | 275,632 | 99,179 | 0.59 | 240,173 | 15,302 | 0.64 | 35,459 |
| CT06 | 85,622 | 0.46 | 295,580 | 86,226 | 0.46 | 318,062 | - 604 | 0.52 | - 22,482 |
| CT07 | 100,028 | 0.57 | 350,661 | 129,169 | 0.56 | 394,634 | - 29,142 | 0.53 | - 43,974 |
| CT08 | 149,519 | 0.43 | 340,365 | 158,946 | 0.43 | 415,520 | - 9,428 | 0.39 | - 75,155 |
| Total | 998,618 | 0.55 | 2,188,146 | 1,015,452 | 0.55 | 2,323,001 | - 16,835 | 0.40 | - 134,855 |

Nota: Elaboración propia

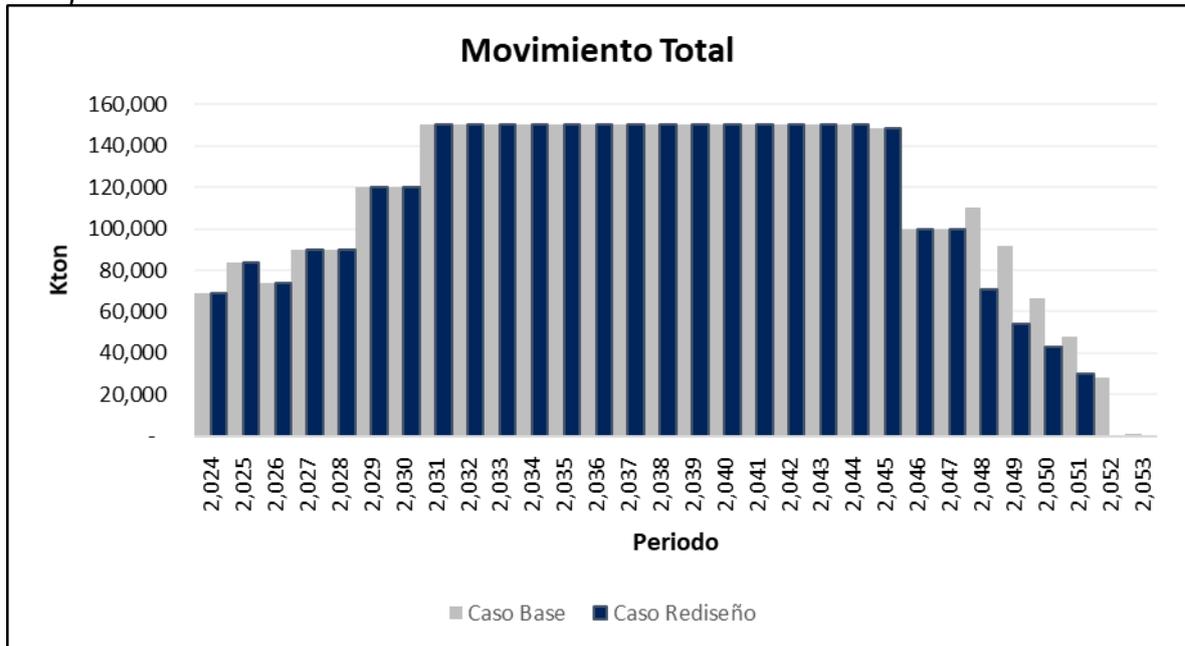
4.2 Plan de Producción

La Figura 27 muestra el comparativo entre ambos casos, se observa que:

- En ambos casos el crecimiento de capacidad de carguío.
- Los últimos años, el movimiento del Caso Rediseño disminuye debido a que tiene menos cantidad de desmote que minar.
- El caso Base opera hasta el año 2053, mientras que el caso rediseño hasta el 2051, esto debido a que el caos rediseño expone más rápido el mineral.

Figura 27

Comparativo -Plan de Producción



Nota: Elaboración propia

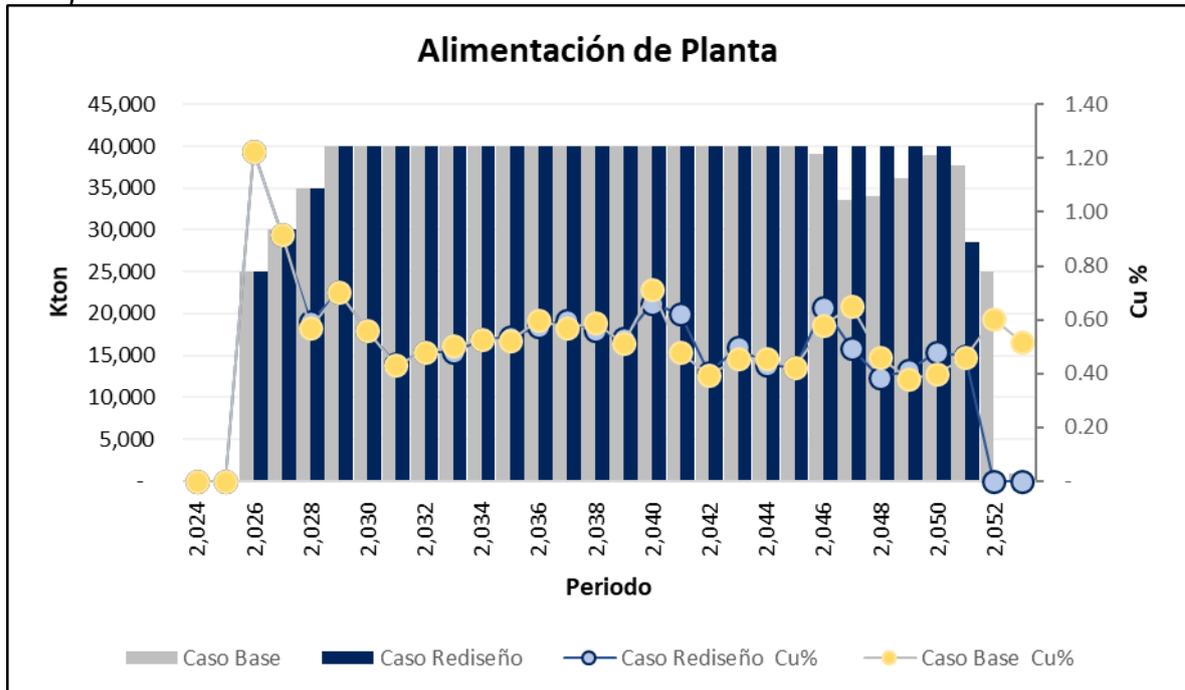
4.3 Alimentación de Planta

La Figura 28 muestra la alimentación de planta de ambos casos, se observa que:

- Ambos casos presentan el mismo incremento de capacidad de planta.
- Ambos casos, los primeros años se extrae el mineral con mejores leyes.
- El caso Base, no llega alimentar a planta en su totalidad en los últimos años, debido a que las últimas fases presentan demasiado desmonte que minar, esto conlleva a no poder exponer el mineral a tiempo, mientras que el caso rediseño si llega alimentar al proceso con la misma capacidad de carguío, debido a que el sistema de rampas en paralelo evita extraer desmonte en exceso.

Figura 28

Comparativo-Alimentación de Planta



Fuente: Elaboración propia

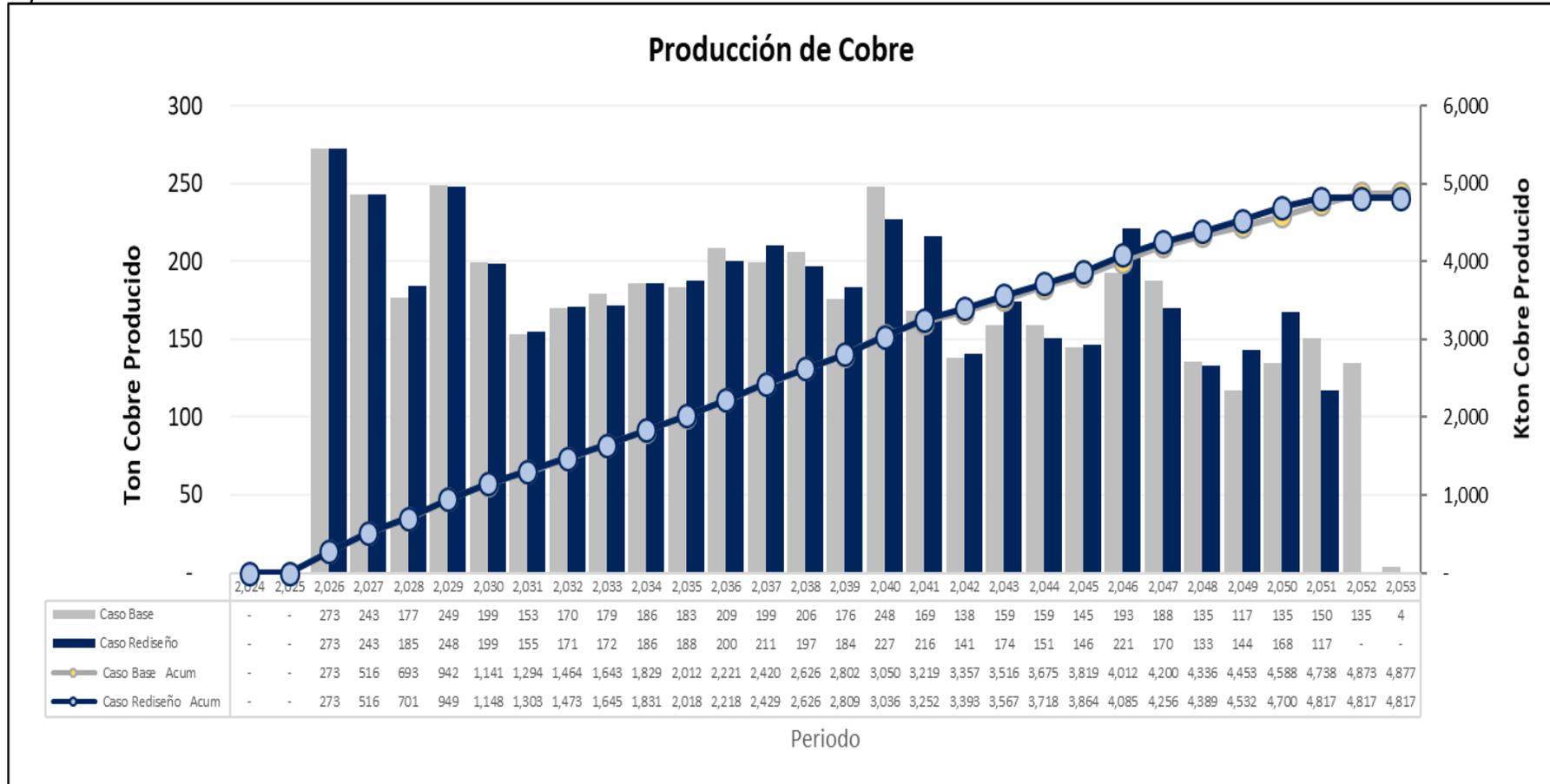
4.4 Producción de Cobre

La Figura 29 muestra la producción de cobre en ambos casos, se observa que:

- El caso Base produce 4,877 kton de cobre, mientras que el caso Rediseño produce 4,817 Kton de cobre.
- El caso Rediseño tiene mayor cobre producido acumulado hasta el año 2051, debido siempre alimenta a planta a su 100% de capacidad.

Figura 29

Comparativo- Cobre Producido



Fuente: Elaboración propia

4.5 Flujo de Caja

La Figura 30 muestra el flujo de descontado de ambos casos, se observa que:

- Los dos primeros años el flujo de caja es negativo debido al pre-stripping.
- El caso Base tiene un valor de 2,462 MU\$\$, mientras que el caso rediseño tiene un valor 2,492 MU\$\$, hay un incremento de 30 MU\$\$.
- El valor del proyecto en los 5 primeros años, el caso Rediseño tiene un mayor valor con respecto al caso Base, mientras que los primeros 20 años, se observa que el valor del caso base es mayor (ver Tabla 15)
- En los primeros 25 años, el caso rediseño presenta mayor valor presente neto, hasta el fin de la vida de la mina (ver Tabla 15)

Tabla 15

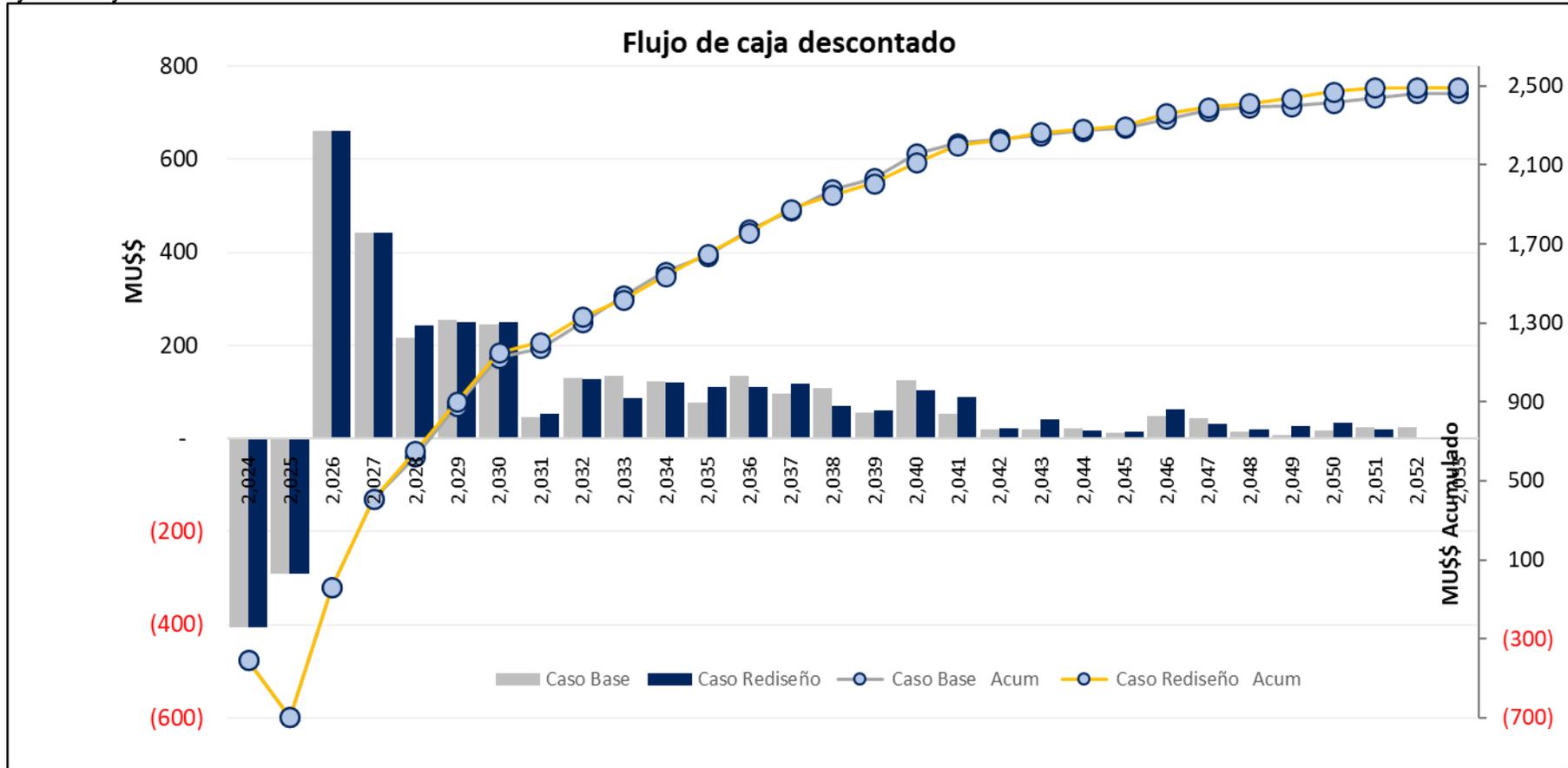
Valor

| Años | Rediseño | Base |
|-------------|-----------------|-------------|
| 5 | 650 | 624 |
| 10 | 1,419 | 1,438 |
| 15 | 1,949 | 1,978 |
| 20 | 2,265 | 2,250 |
| 25 | 2,411 | 2,391 |
| 32 | 2,492 | 2,462 |

Nota: Elaboración propia

Figura 30

Flujo de Caja Descontado



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La implementación de un sistema de rampas en paralelo en el diseño del tajo final y sus fases de minado permite optimizar el ángulo global de diseño, incrementándolo de 35.3° a 37.8°.

La implementación de sistema de rampas en paralelo en el diseño del pit final y fases de minado, permite una disminución de desmonte de 135 Mton aproximadamente.

La reducción del desmonte facilita un suministro constante de mineral a la planta en los últimos años, ya que el menor volumen de desmonte permite exponer el mineral más rápidamente. Esto se logra manteniendo el mismo movimiento total en ambos planes de minado.

El valor del proyecto en los 5 primeros años en el caso Rediseño, tiene un mayor valor presente neto con respecto al caso Base, aproximadamente en +4%, y un incremento de +1.2% en el valor del proyecto (+30MU\$\$)

Tener mejores ingresos en los primeros años, desde el punto de vista del inversionista, hace el proyecto más atractivo debido a que el tiempo de retorno de capital disminuye.

A menudo buscamos nuevas herramientas y algoritmos para optimizar el valor en los procesos de planificación a largo plazo, pero es fundamental recordar que el diseño de minas es un proceso que también requiere la experiencia y el arte del ingeniero. Aunque los softwares en la industria ayudan a plasmar la visión del ingeniero en el diseño, es crucial seguir desarrollando la literatura con técnicas y herramientas innovadoras para optimizar el diseño y lograr la recuperación total del mineral con el menor desmonte posible. Este trabajo contribuye a proporcionar a los nuevos ingenieros técnicas adicionales para realizar un diseño óptimo de fases y del pit final.

Recomendaciones

Fomentar nuevas técnicas de diseño de mina, para así poder tener diferentes técnicas y ver cual se adecua más a la mina que se esté evaluando, a su vez ayuda a que haya más literatura con respecto al diseño de minas, ya que en la actualidad el proceso de diseño de minas es un proceso que depende mucho de la experiencia y el arte del ingeniero.

Se debe buscar nuevos indicadores, más allá del valor presente neto, que permitan comparar diversos casos, nuevas tecnologías que se quieran implementar, que ayuden al ingeniero a tomar mejores decisiones.

Debemos ser conscientes que el proceso de diseño de minas es uno de los más importantes, ya que aquí se define el valor del proyecto y la cantidad de mineral que se va extraer, al no tener un diseño óptimo por más algoritmos, herramientas que se tenga que permitan optimizar el plan de producción, el valor proyecto no será el óptimo.

Referencias bibliográficas

- Niño, C (2017). *Maximización de valor a través de la optimización del diseño de fases y plan de producción de una mina a tajo abierto.*
- Thompson, R. (2003). *Mine haul road maintenance management systems.* En: Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy.
Cap. 05, págs. 303-312.
- Thompson, R. (2011). *Design, Construction and Maintenance of Haul Road.* En: SME Mining Engineering Handbook. Darling P. 3rd. Society for Mining, Metallurgy, y Exploration. Cap. 10, págs. 957-977.
- Whittle, D. (2011). *Open Pit Planning and Design.* En: SME Mining Engineering Handbook.3rd. Darling P., págs. 877-901.
- Whittle, D. (1998). *Four-X user manual.* En: Melbourne: Whittle Programming Pty Ltd.

Anexos

| | Pág. |
|--|------|
| Anexo 1: Secuencia de minado Caso Base | 1 |
| Anexo 2: Secuencia de minado Caso Rediseño | 16 |

Anexo 1: Secuencia de minado Caso Base

Ilustración 1 Minado 2024 – Caso Base

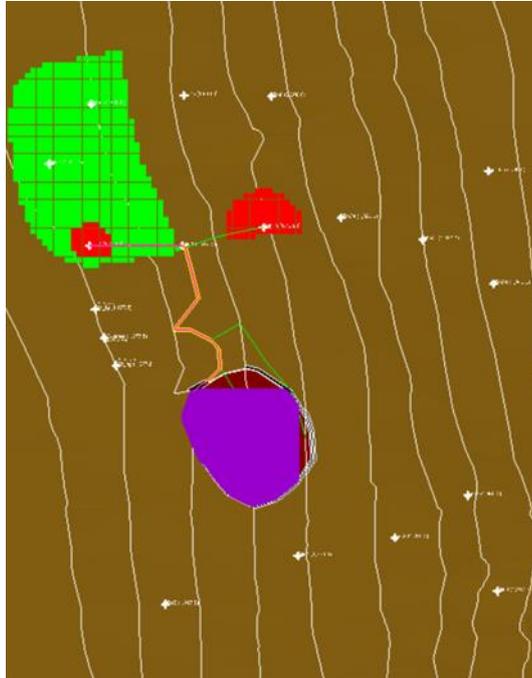


Ilustración 2 Minado 2025 – Caso Base

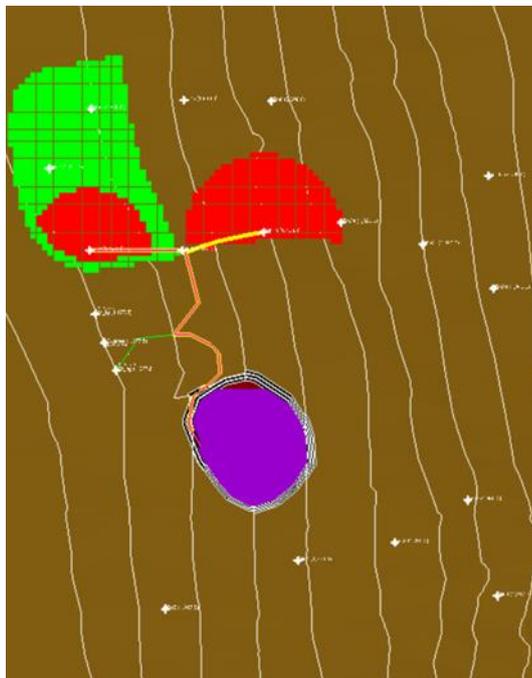


Ilustración 3 Minado 2026 – Caso Base

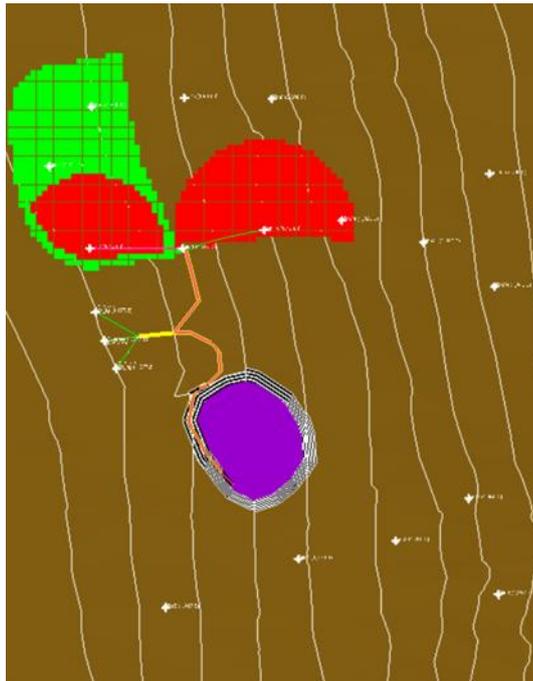


Ilustración 4 Minado 2027 – Caso Base

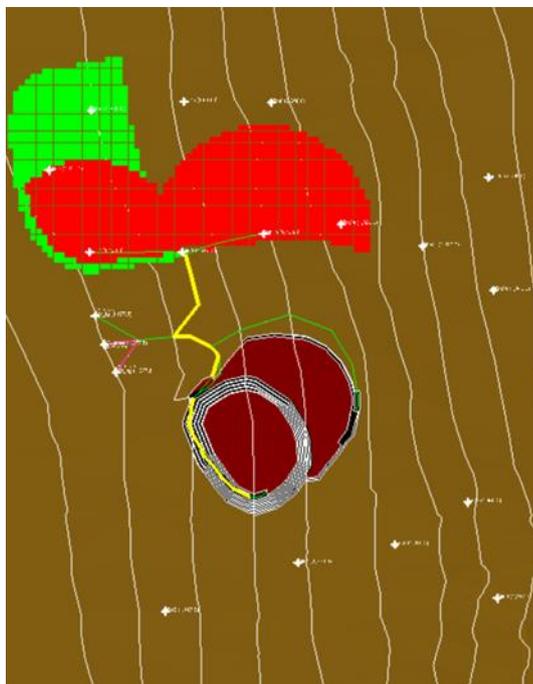


Ilustración 5 Minado 2028 – Caso Base

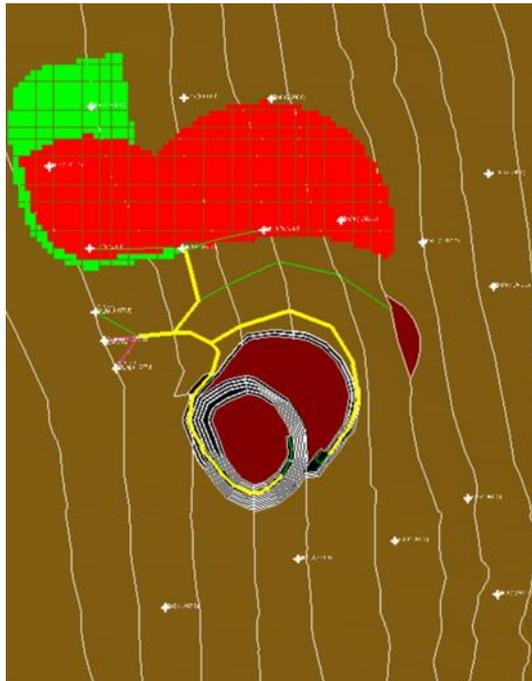


Ilustración 6 Minado 2029 – Caso Base

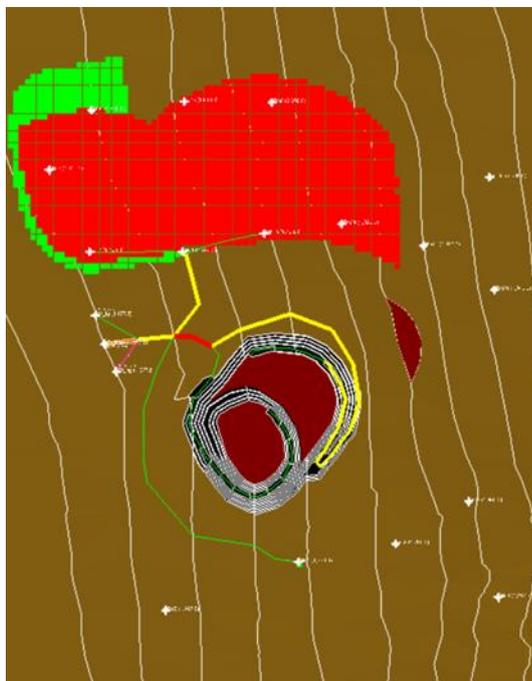


Ilustración 9 Minado 2032 – Caso Base

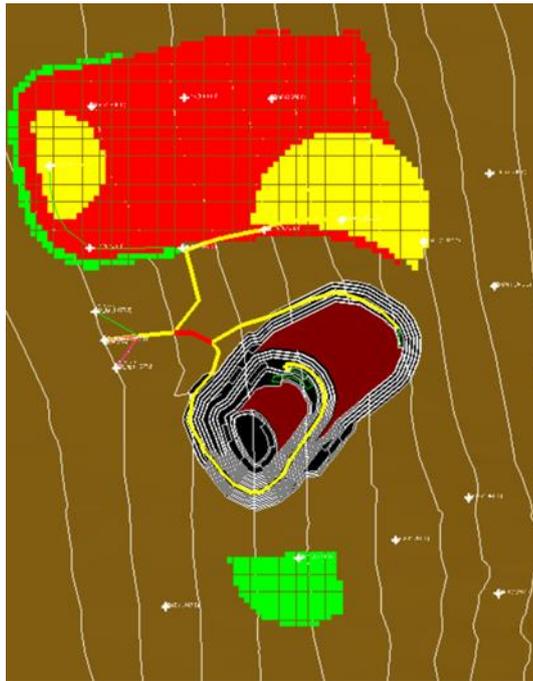


Ilustración 10 Minado 2033 – Caso Base

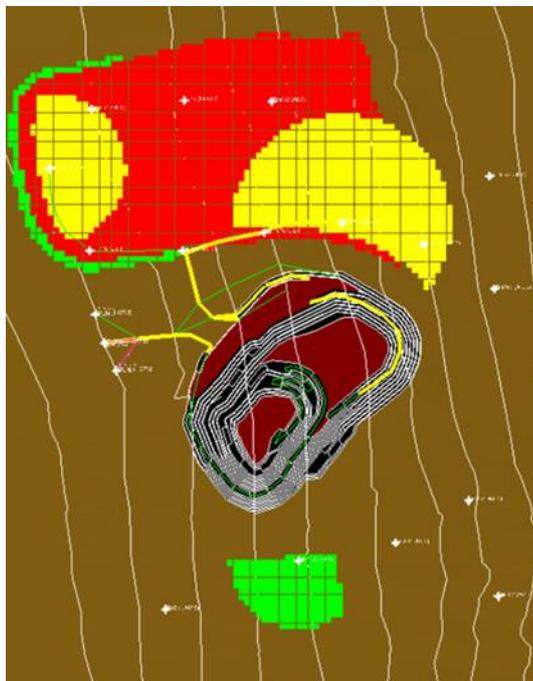


Ilustración 31 Minado 2034 – Caso Base

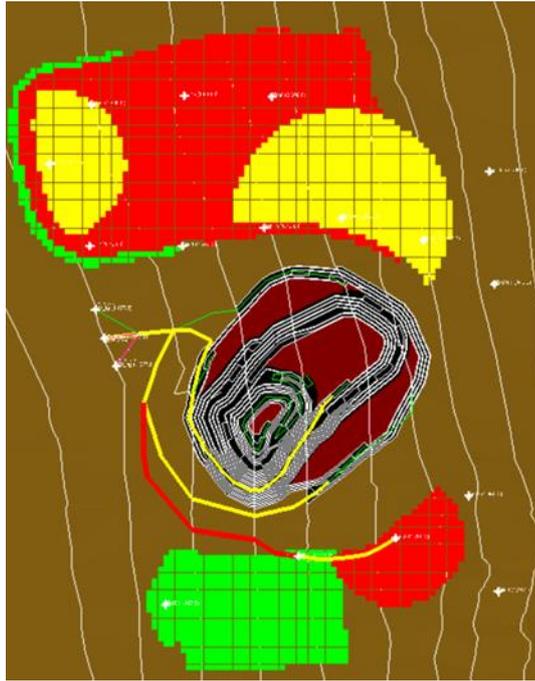


Ilustración 14 Minado 2035 – Caso Base

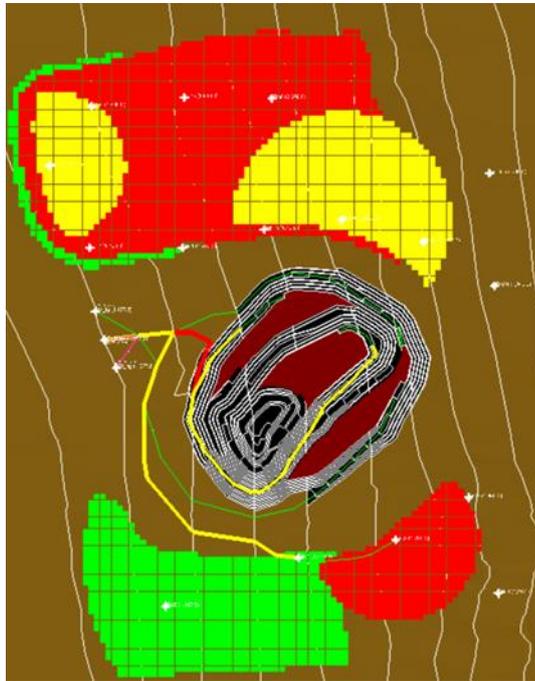


Ilustración 53 Minado 2036 – Caso Base

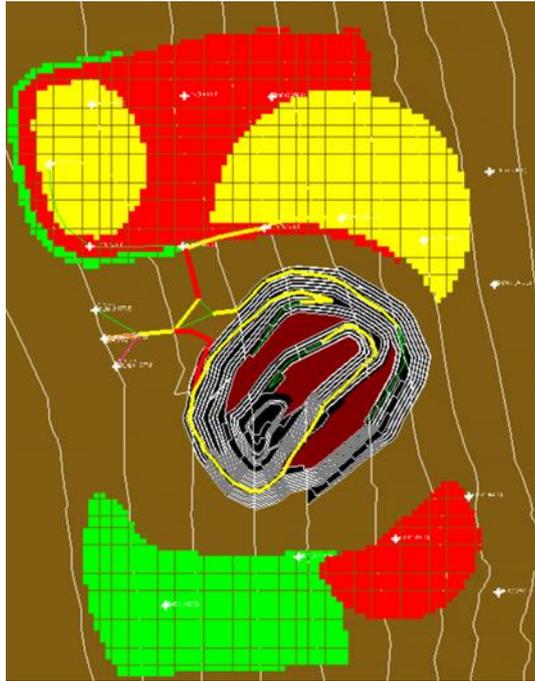


Ilustración 14 Minado 2037 – Caso Base

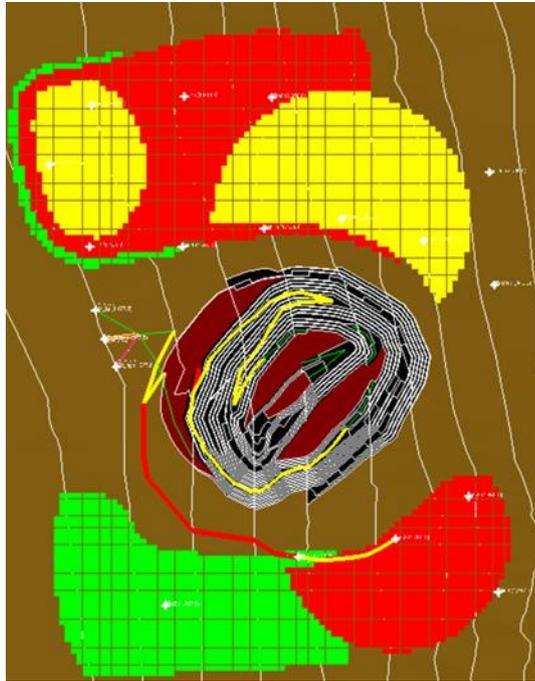


Ilustración 65 Minado 2038 – Caso Base

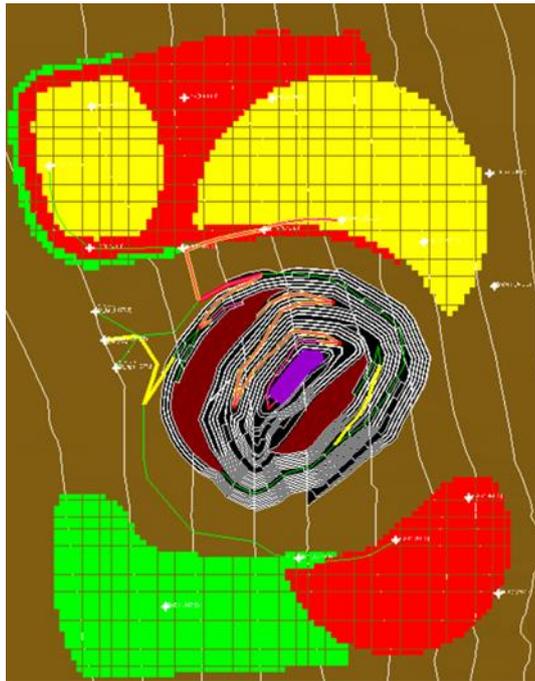


Ilustración 16 Minado 2039 – Caso Base



Ilustración 77 Minado 2040 – Caso Base



Ilustración 18 Minado 2041 – Caso Base

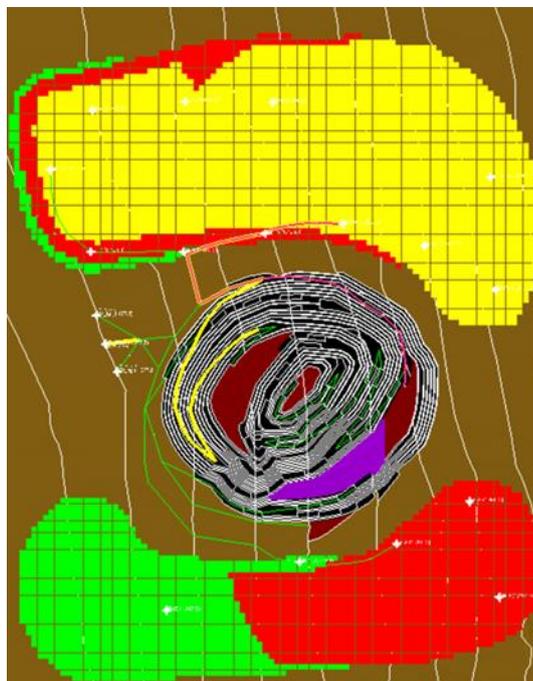


Ilustración 89 Minado 2042 – Caso Base

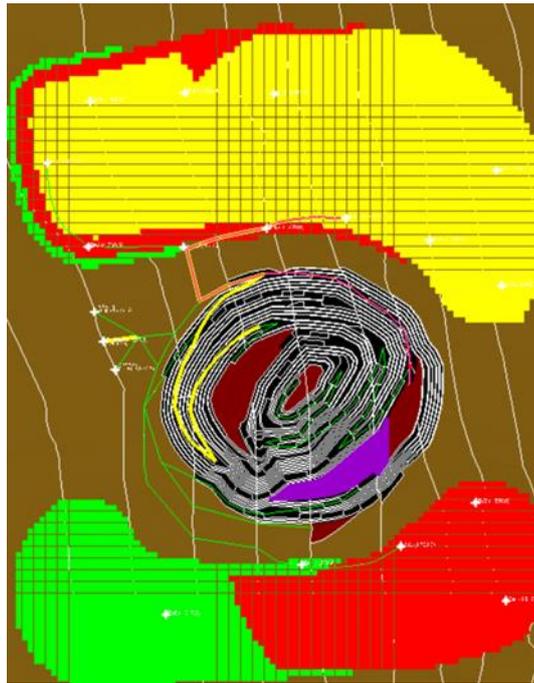


Ilustración 20 Minado 2043 – Caso Base

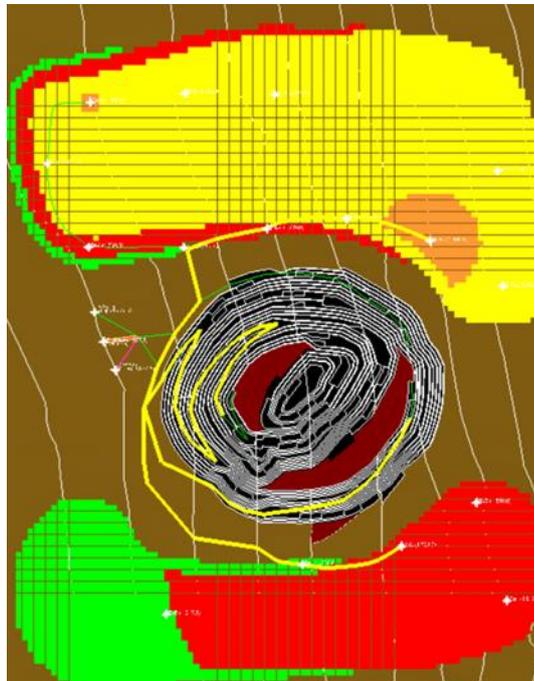


Ilustración 21 Minado 2044 – Caso Base

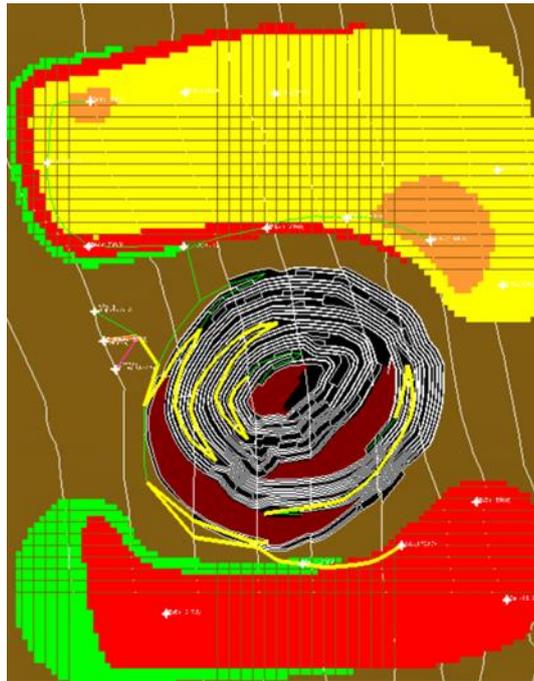


Ilustración 22 Minado 2045 – Caso Base

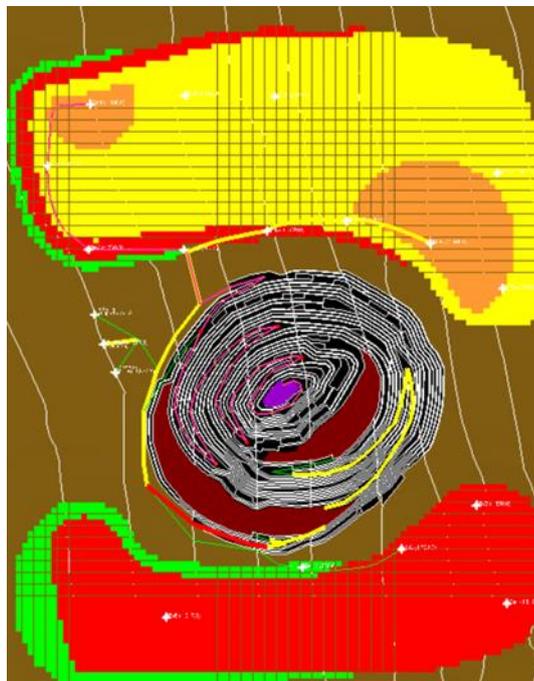


Ilustración 23 Minado 2046 – Caso Base

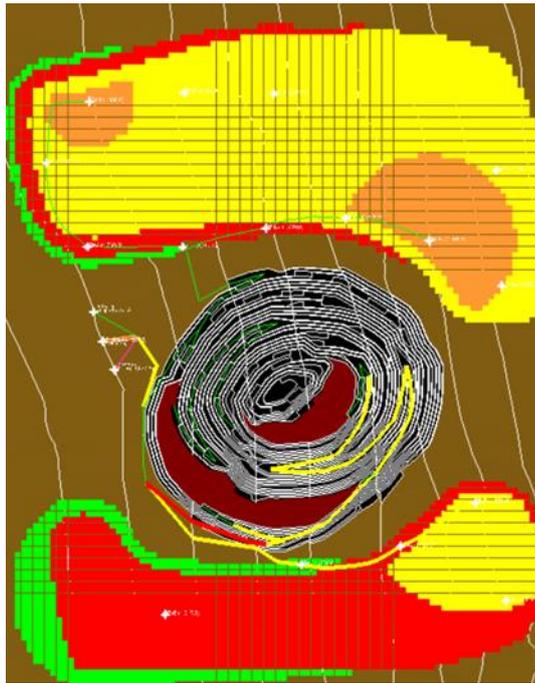


Ilustración 24 Minado 2047 – Caso Base

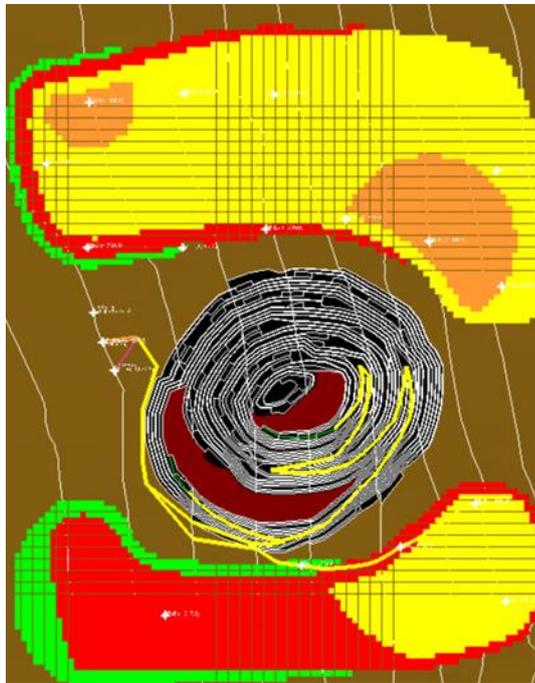


Ilustración 25 Minado 2048 – Caso Base

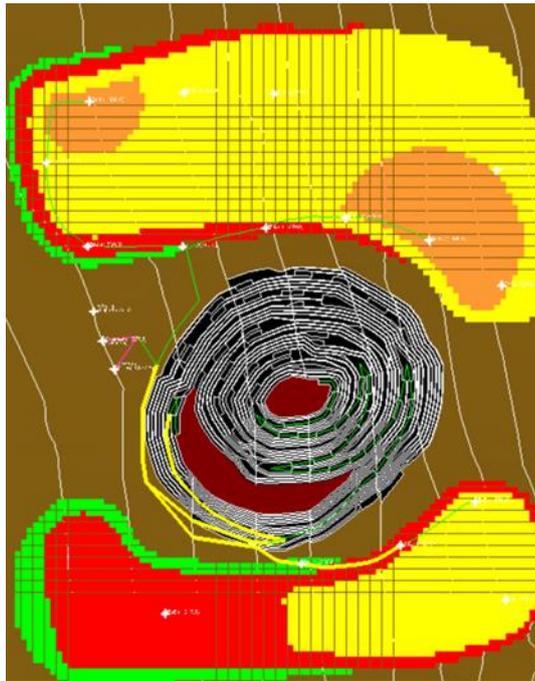


Ilustración 26 Minado 2049 – Caso Base

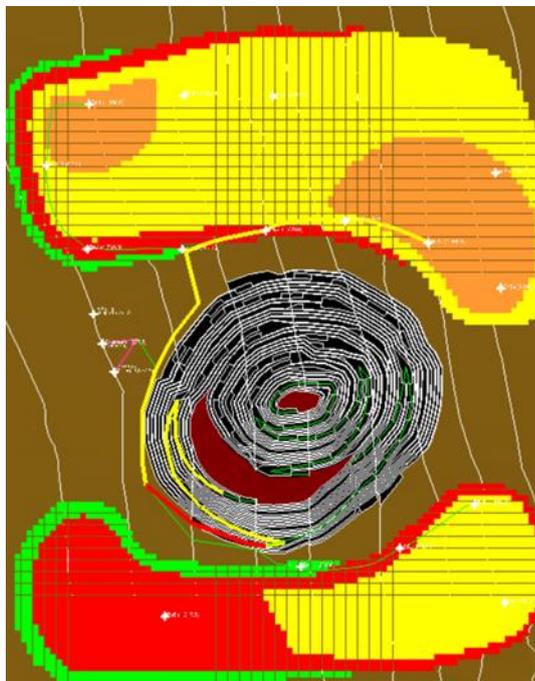


Ilustración 27 Minado 2050 – Caso Base

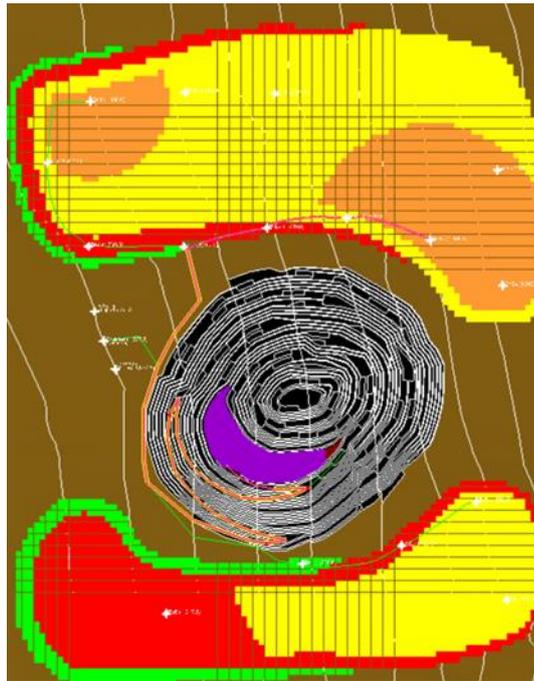


Ilustración 28 Minado 2051 – Caso Base

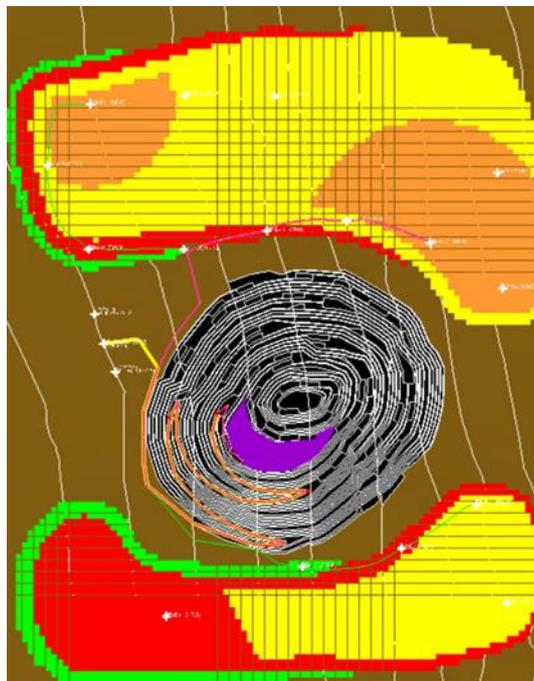


Ilustración 29 Minado 2052 – Caso Base

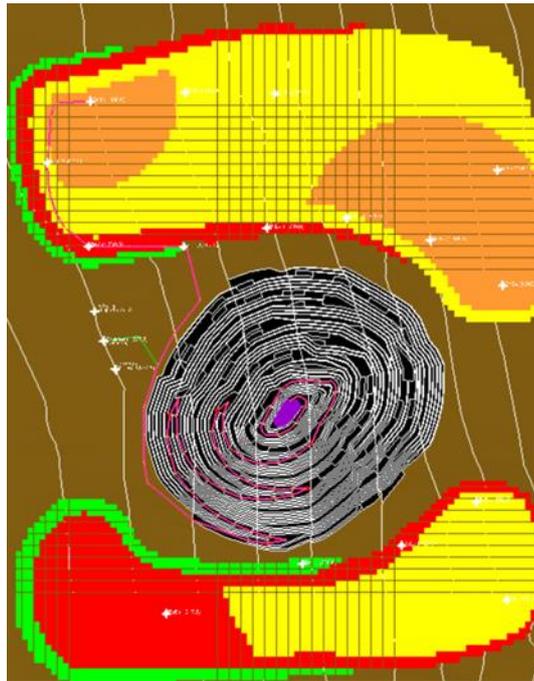
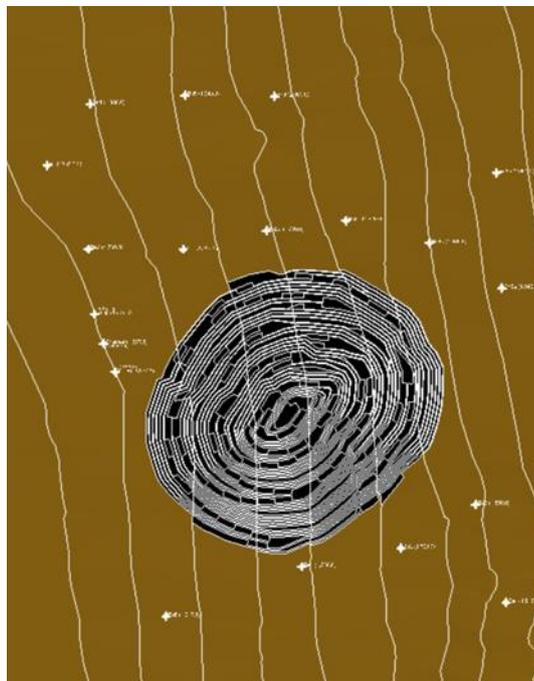


Ilustración 30 Minado 2053 – Caso Base



Anexo 2: Secuencia de minado Caso Rediseño

Ilustración 9 Minado 2024 – Caso Rediseño

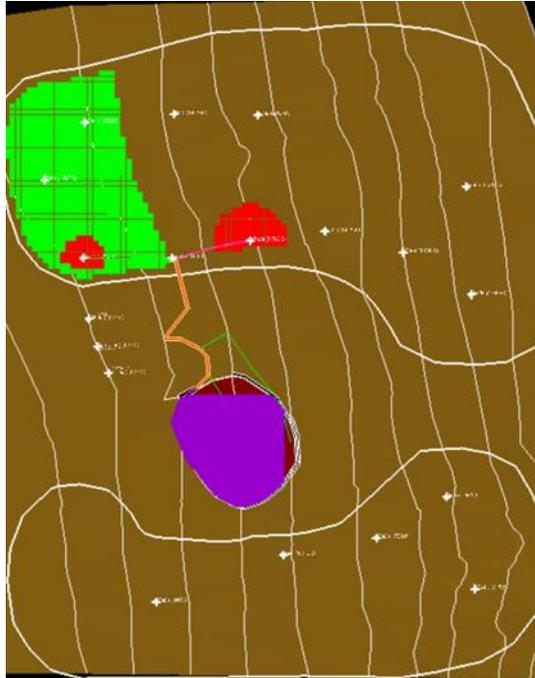


Ilustración 10 Minado 2025 – Caso Rediseño

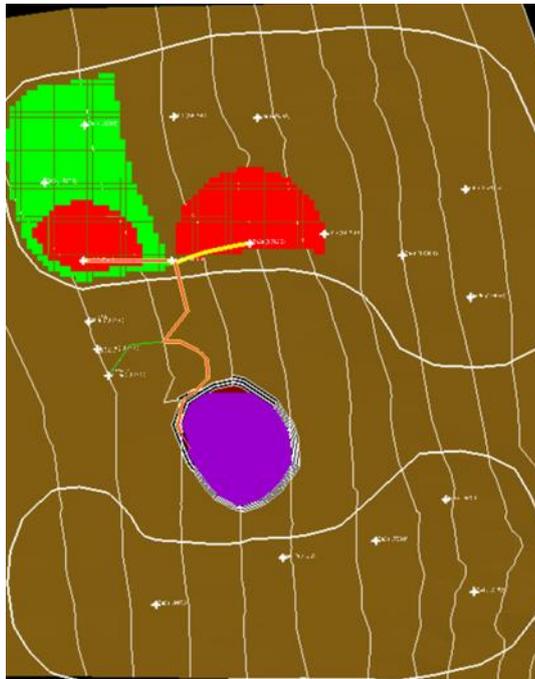


Ilustración 3 Minado 2026 – Caso Rediseño

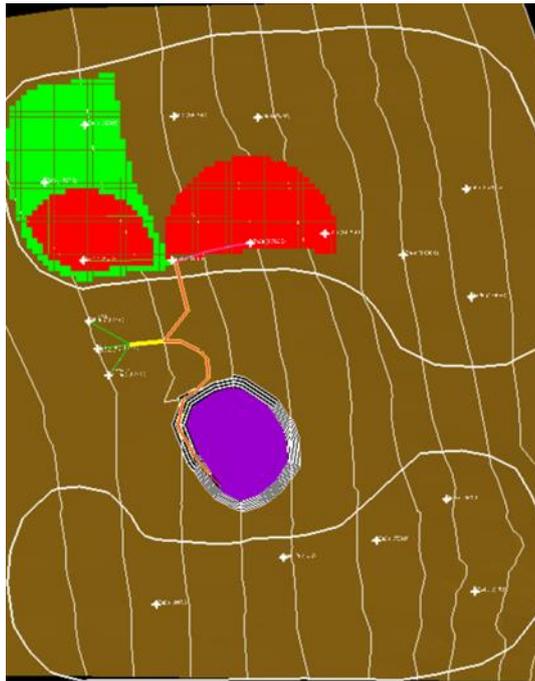


Ilustración 4 Minado 2027 – Caso Rediseño

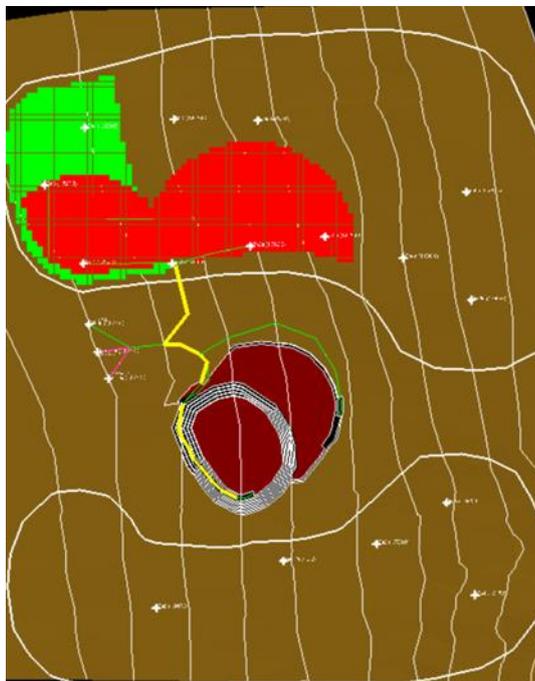


Ilustración 5 Minado 2028 – Caso Rediseño

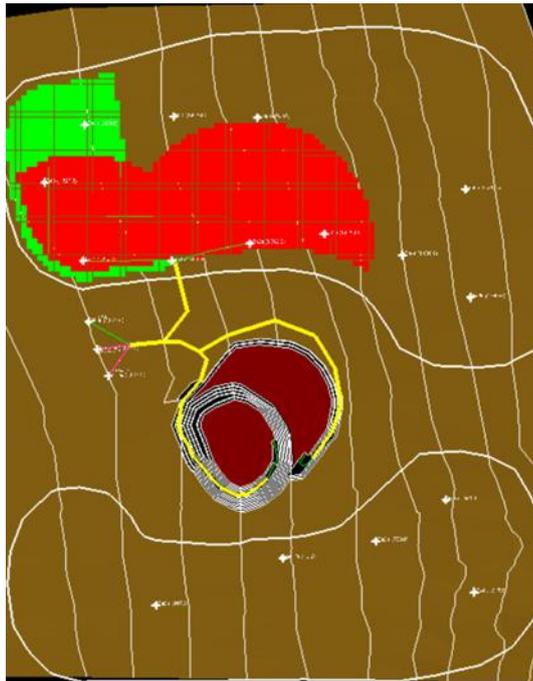


Ilustración 6 Minado 2029 – Caso Rediseño

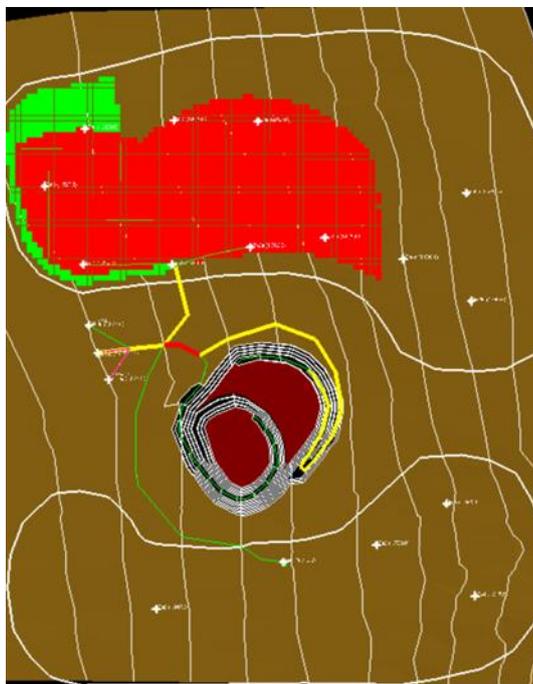


Ilustración 7 Minado 2030 – Caso Rediseño

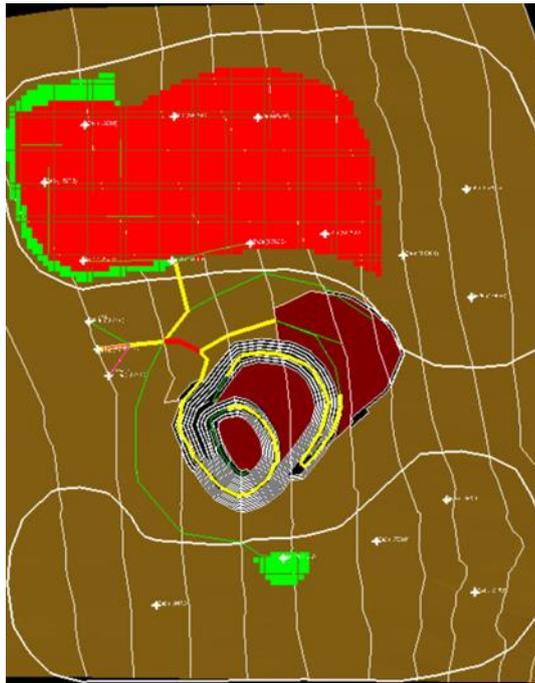


Ilustración 8 Minado 2031 – Caso Rediseño

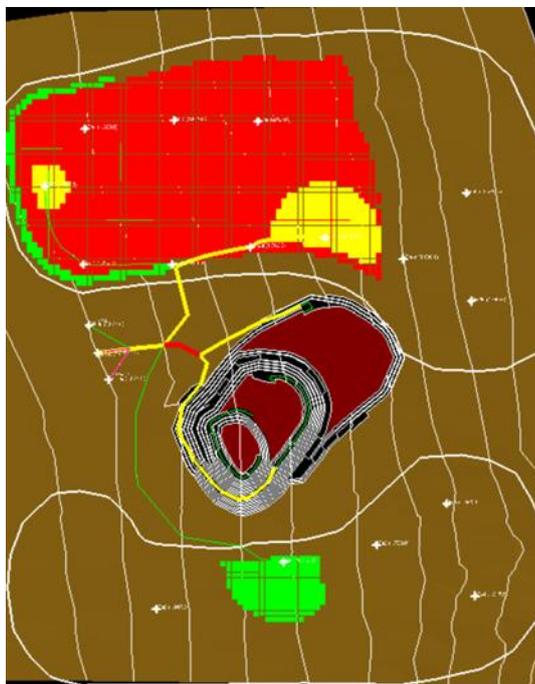


Ilustración 9 Minado 2032 – Caso Rediseño

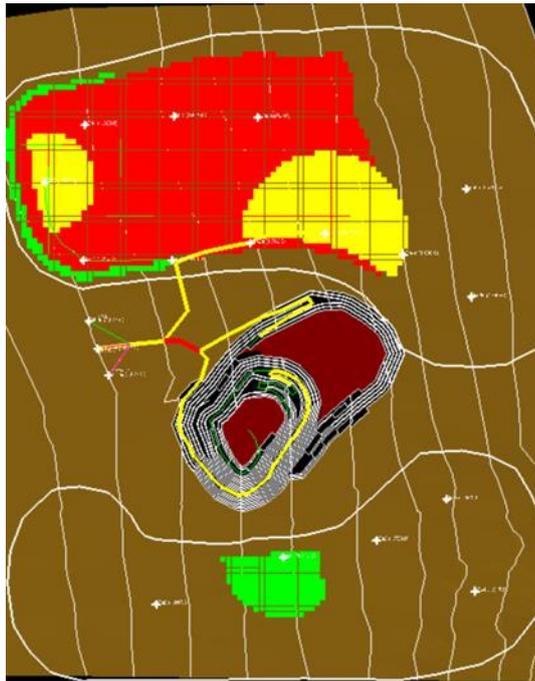


Ilustración 10 Minado 2033 – Caso Rediseño

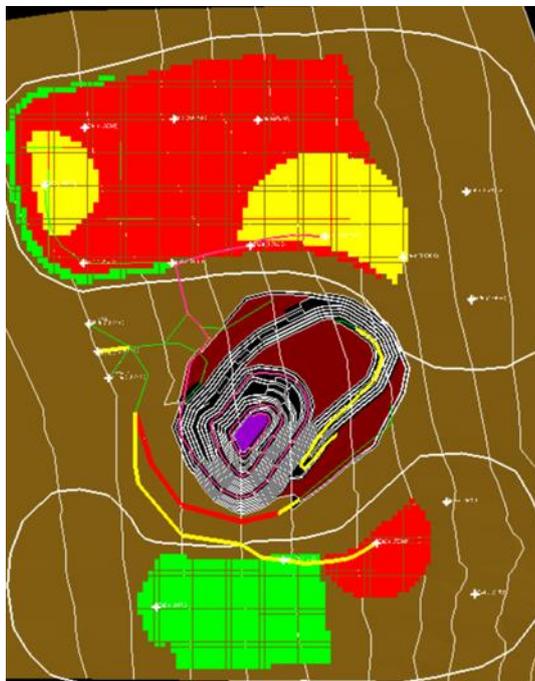


Ilustración 111 Minado 2034 – Caso Rediseño

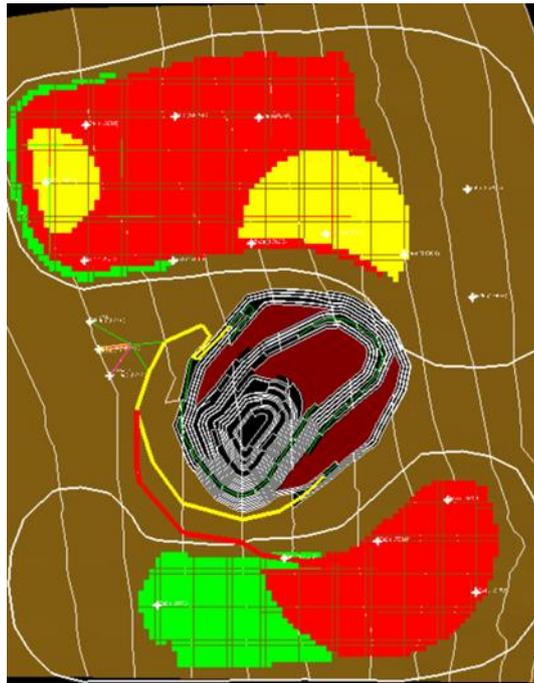


Ilustración 112 Minado 2035 – Caso Rediseño

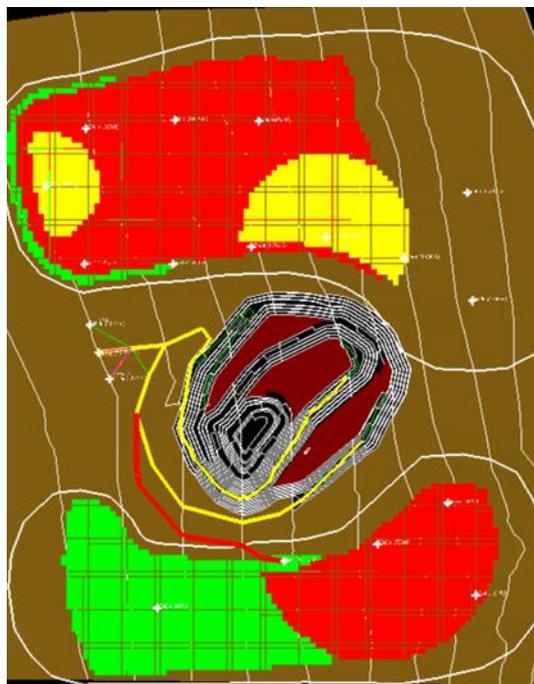


Ilustración 13 Minado 2036 – Caso Rediseño

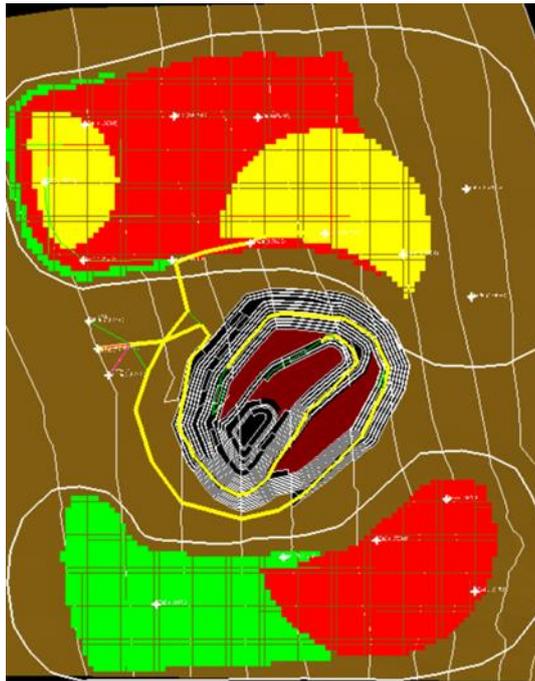


Ilustración 14 Minado 2037 – Caso Rediseño

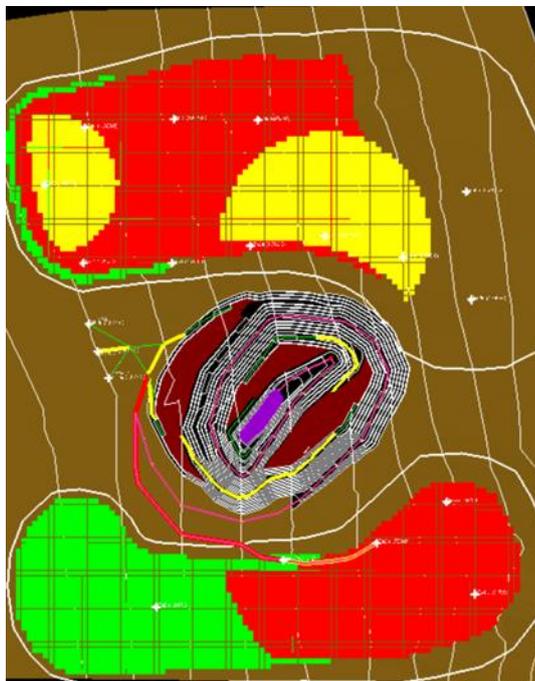


Ilustración 15 Minado 2038 – Caso Rediseño

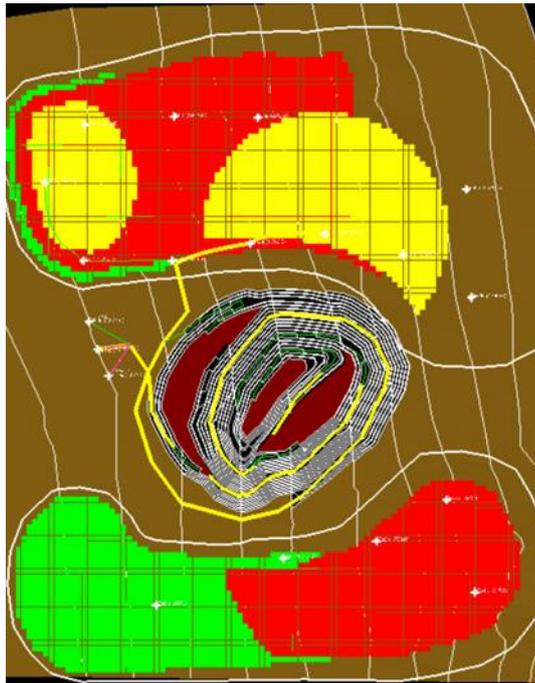


Ilustración 16 Minado 2039 – Caso Rediseño

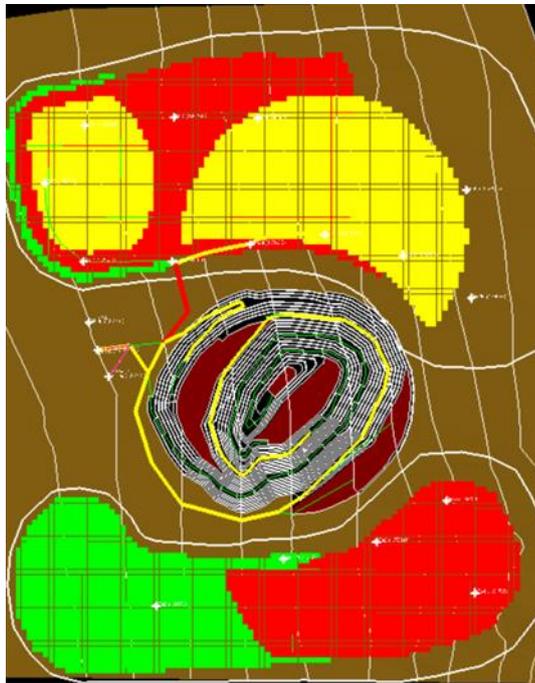


Ilustración 17 Minado 2040 – Caso Rediseño

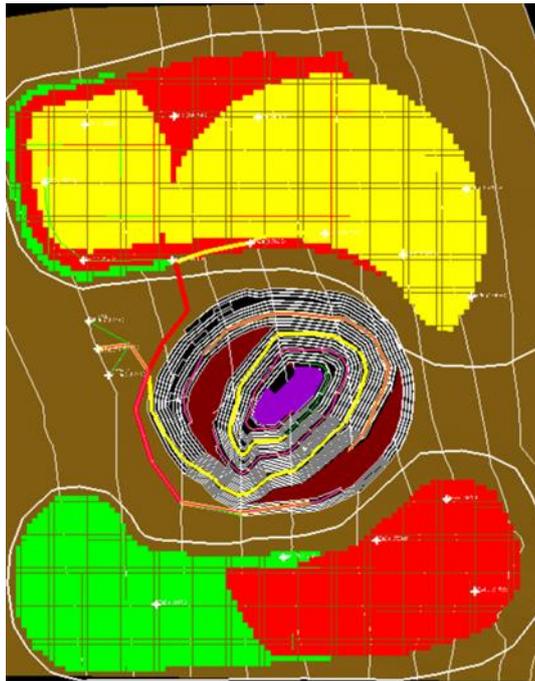


Ilustración 18 Minado 2041 – Caso Rediseño

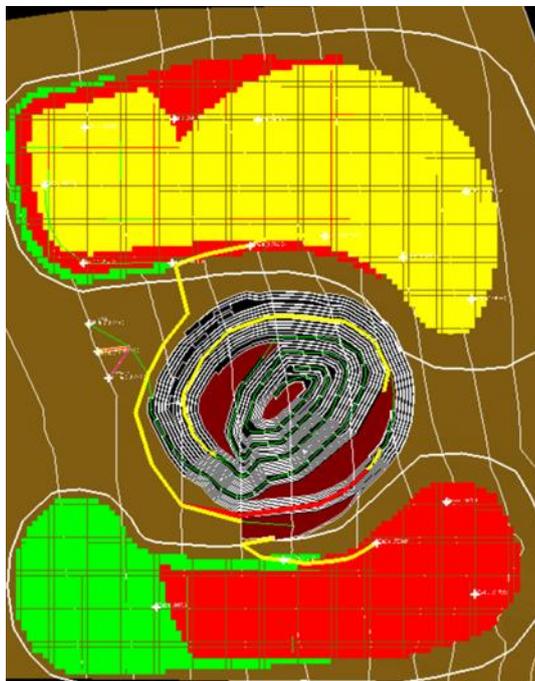


Ilustración 19 Minado 2042 – Caso Rediseño

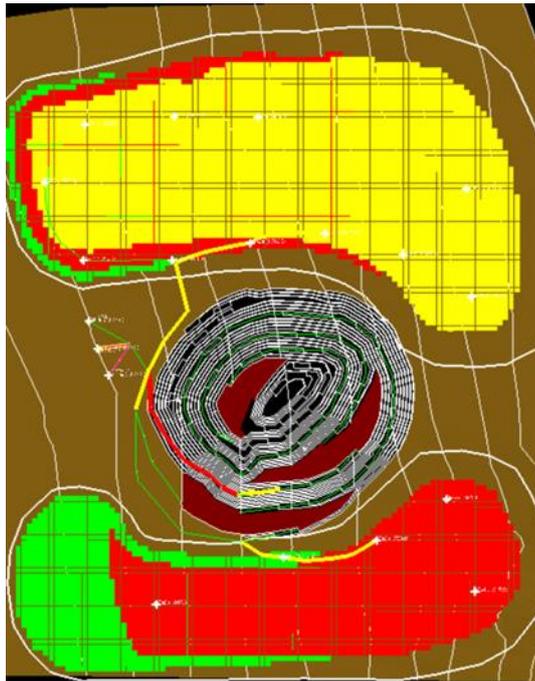


Ilustración 20 Minado 2043 – Caso Rediseño

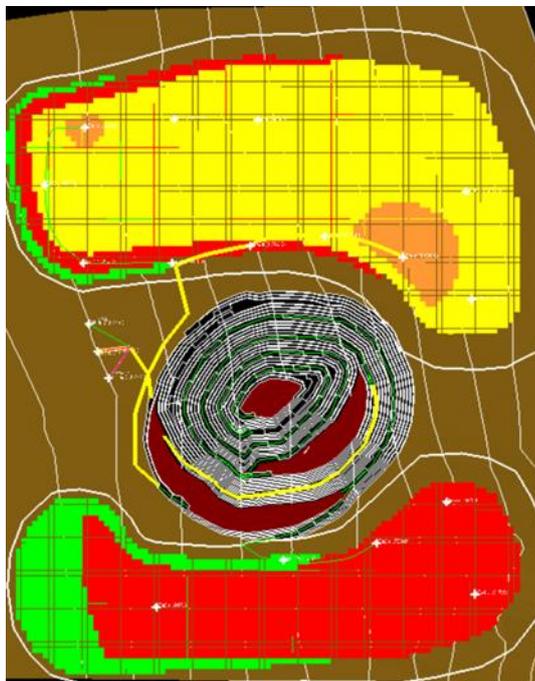


Ilustración 21 Minado 2044 – Caso Rediseño

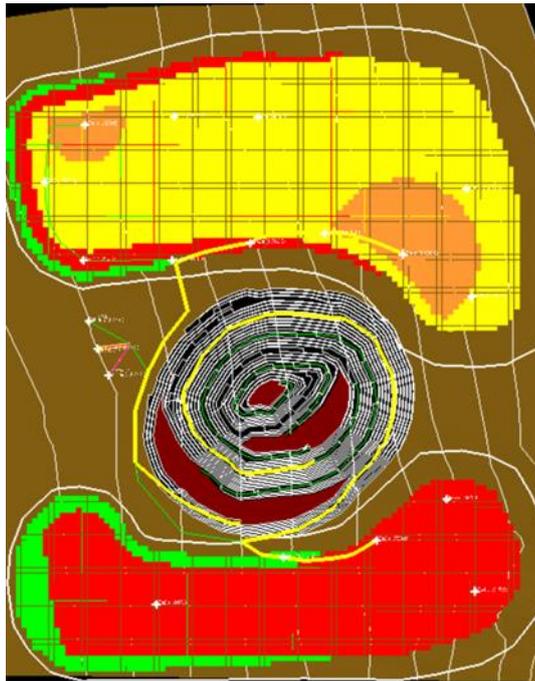


Ilustración 22 Minado 2045 – Caso Rediseño

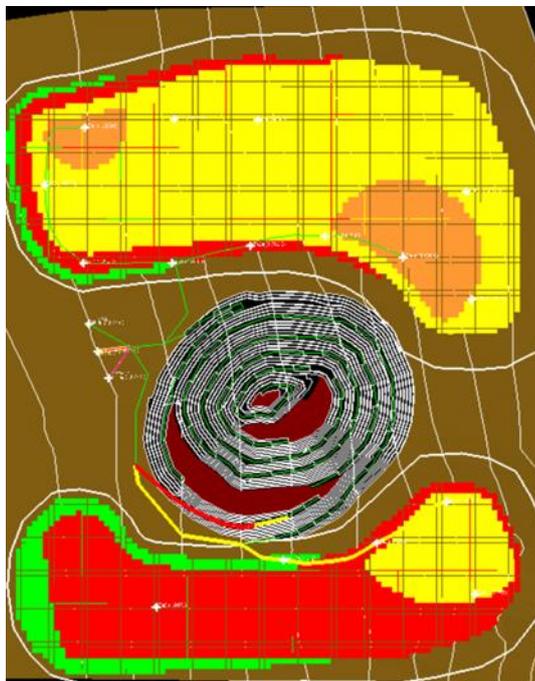


Ilustración 23 Minado 2046 – Caso Rediseño

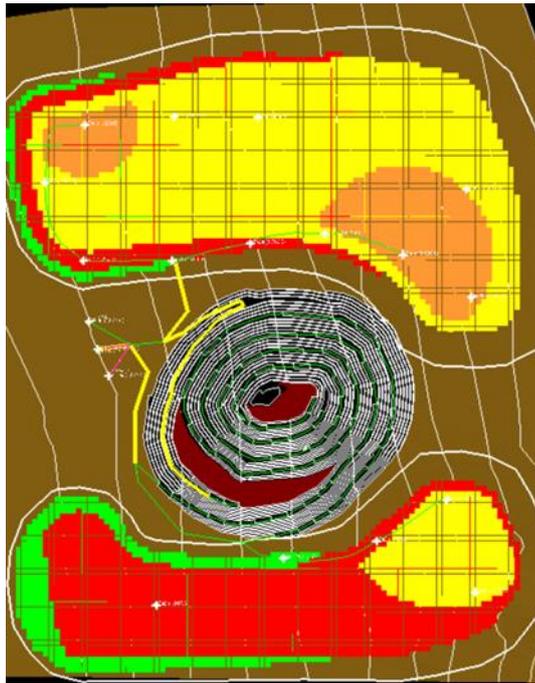


Ilustración 24 Minado 2047 – Caso Rediseño

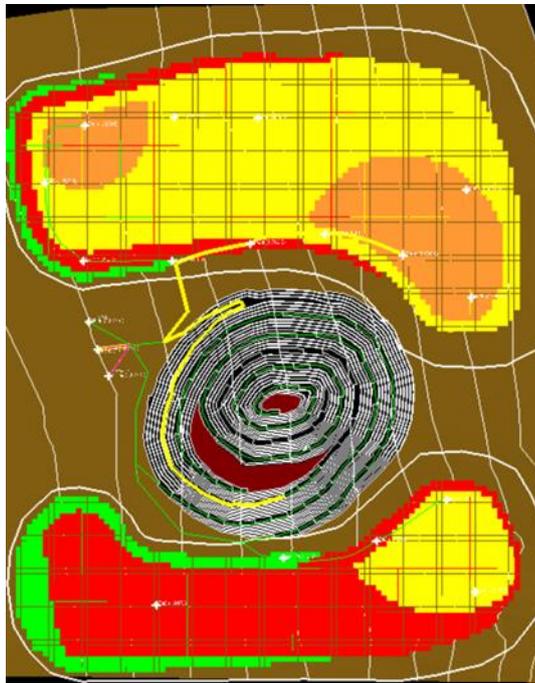


Ilustración 25 Minado 2048 – Caso Rediseño

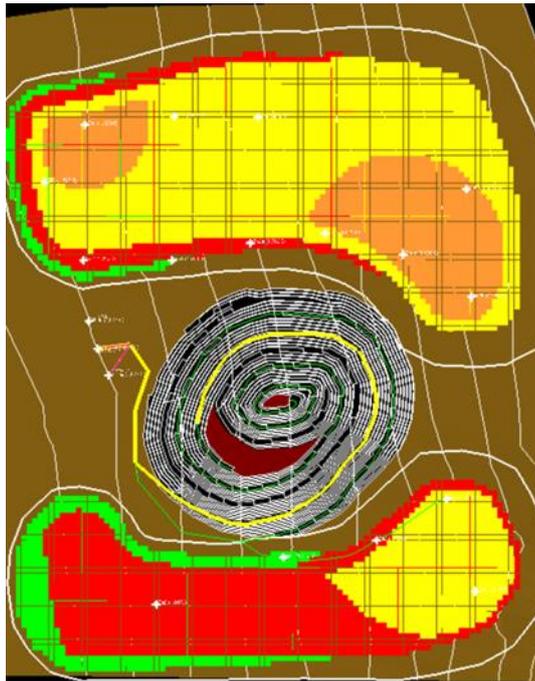


Ilustración 26 Minado 2049 – Caso Rediseño

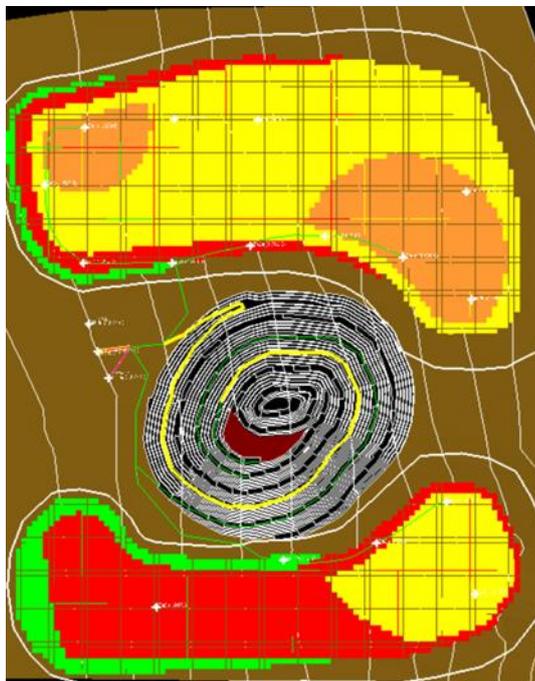


Ilustración 27 Minado 2050 – Caso Rediseño

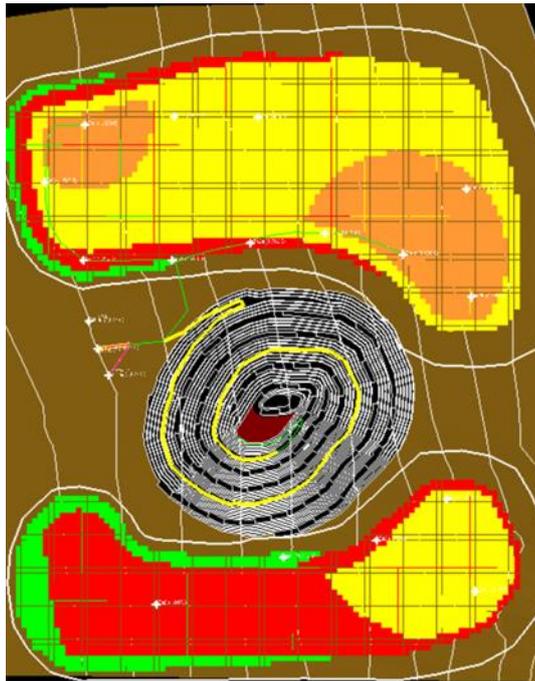


Ilustración 28 Minado 2051 – Caso Rediseño

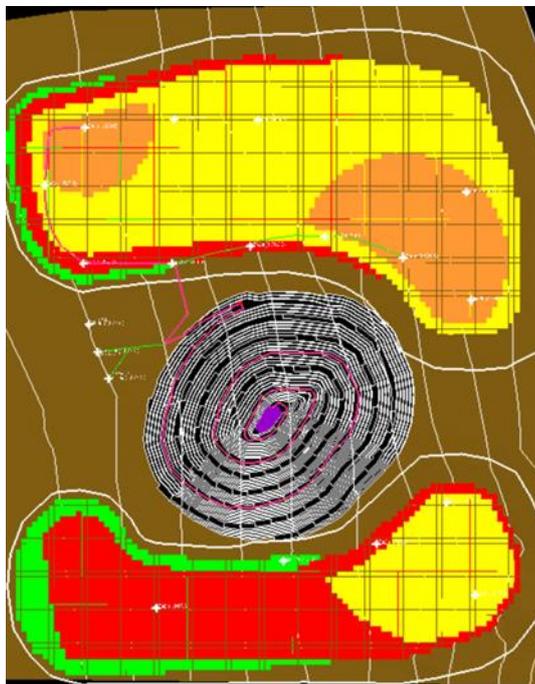


Ilustración 29 Minado 2052 – Caso Rediseño

