

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Mejora de las operaciones unitarias mediante un modelo de
gestión basado en un software de simulaciones en una mina
subterránea**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Paolo César Villanueva Cristóbal

 [0009-0005-1485-0895](https://orcid.org/0009-0005-1485-0895)

Asesor

MBA. Eder León Salazar Dulanto

 [0000-0002-1400-3144](https://orcid.org/0000-0002-1400-3144)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Villanueva Cristóbal [1]
Referencia/Reference	[1] P. Villanueva Cristóbal , “ <i>Mejora de las operaciones unitarias mediante un modelo de gestión basado en un software de simulaciones en una mina subterránea</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Villanueva, 2025)
Referencia/Reference	Villanueva, P. (2025). <i>Mejora de las operaciones unitarias mediante un modelo de gestión basado en un software de simulaciones en una mina subterránea</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedicado en memoria de mi abuela Dina por su perseverancia y nobleza, que siempre me acompañó en los momentos más difíciles de mi vida, a mis padres, César e Isabel, y a mi novia Karol, quienes fueron mi mayor pilar durante mi carrera universitaria y profesional.

Agradecimientos

Mi eterno agradecimiento hacia nuestro creador Dios, a mi familia, mi querida alma mater y a mis asesores académicos, al MSc. Ing. Eder Salazar Dulanto y al MSc. Ing. José Corimanya Mauricio por su apoyo en el desarrollo de la presente tesis.

Resumen

Diversas unidades mineras en el país enfrentan la necesidad de incrementar su productividad de forma eficiente y con costos reducidos, asegurando al mismo tiempo el cumplimiento de los estándares de seguridad ocupacional y protección ambiental.

La implementación del software Simprep en el estudio ingenieril responde a dos necesidades, calibrar los indicadores en función a la realidad operativa y emplear ese modelo como base de seguimiento operacional a corto plazo. Además, es capaz de evaluar métricas de desempeño de la programación, al cargar una proyección de avance planificada y comparar con los resultados obtenidos.

La presente investigación sustenta de manera técnica y eficaz el proceso de planificación de las labores de preparación y desarrollo minero a corto y mediano plazo, incorporando el aprovechamiento óptimo de los recursos mediante la simulación de la interacción entre las áreas de trabajo, las tareas de preparación y los recursos disponibles.

El presente estudio tiene como finalidad incrementar la eficiencia operativa de las actividades unitarias del ciclo minero, contribuyendo al cumplimiento de los estándares de desempeño establecidos en la planificación estratégica.

A través del análisis sistemático de datos operativos, se busca fortalecer la gestión de la preparación de tajeos, permitiendo una ejecución más precisa de las labores mineras. Esta investigación se orienta a la mejora continua de los indicadores de productividad, con impacto directo en la sostenibilidad y el rendimiento de la producción.

Palabras clave — Productividad, software, preparación, producción, tajeos.

Abstract

Various mining units in the country face the need to increase their productivity efficiently and at reduced costs, while simultaneously ensuring compliance with occupational safety standards and environmental protection regulations.

The implementation of the Simprep software in this engineering study addresses two key needs: calibrating performance indicators based on operational reality, and using this model as a foundation for short-term operational tracking. Additionally, it is capable of evaluating scheduling performance metrics by uploading a planned progress projection and comparing it with the actual results obtained.

This research provides a technical and effective foundation for the planning process of short- and medium-term mine preparation and development activities, incorporating the optimal utilization of resources through the simulation of interactions between work areas, preparation tasks, and available resources.

The present study aims to increase the operational efficiency of the unitary activities of the mining cycle, contributing to compliance with the performance standards established in strategic planning.

Through the systematic analysis of operational data, it is sought to strengthen the management of the preparation of stopes, allowing a more precise execution of mining operations. This research is aimed at the continuous improvement of productivity indicators, with direct impact on sustainability and production performance.

Keywords — Productivity, software, preparation, production, stopes.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos del estudio	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Hipótesis	2
1.4.1 Hipótesis general	2
1.4.2 Hipótesis específicas	2
1.5 Variables	3
1.5.1 Variables dependientes	3
1.5.2 Variable independiente	3
1.6 Antecedentes investigativos	3
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	6
2.1 Marco teórico	6
2.1.1 Simulación Simprep	6
2.1.2 Flujo del proceso de gestión	15
2.1.3 Secuencia de minado global	18
2.1.4 Ciclo de avance	19
2.1.5 Ciclo de producción	23
2.2 Marco conceptual	30

2.2.1	Productividad.....	30
2.2.2	Producción	30
2.2.3	Eficiencia.....	30
2.2.4	Disponibilidad.....	30
2.2.5	Utilización.....	30
2.2.6	Simulación.....	30
2.2.7	Adherencia	30
2.2.8	Cumplimiento	31
2.2.9	Planificación	31
2.2.10	Frente.....	31
2.2.11	Turno.....	31
2.2.12	Nivel	31
2.2.13	Suministro	31
2.2.14	Sección	31
2.2.15	Modelamiento.....	31
2.2.16	Secuenciamiento.....	32
2.2.17	Voladura.....	32
2.2.18	Transporte.....	32
2.2.19	Fraguado.....	32
2.2.20	Tajeo	32
2.2.21	Barreno	32
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		33
3.1	Recolección de datos	33
3.1.1	Indicadores de los equipos mecanizados	34
3.1.2	Identificación de principales desviadores.....	41
3.1.3	Análisis del cuello de botella.....	43
3.2	Procesamiento de la información.....	45
3.3	Reportabilidad mediante evaluación de riesgos críticos	47

3.4	Algoritmo del software Simprep	50
3.4.1	Definición del modelo Simprep	51
3.4.2	Ingreso del plan mensual (Hitos y precedencias)	51
3.4.3	Configuración del modelo de simulación	51
3.4.4	Definición y asignación de secuencias por área	52
3.4.5	Definición de recursos y capacidades	52
3.4.6	Asignación de recursos por secuencia y área.....	52
3.4.7	Generación de resultados.....	52
3.4.8	Validación del modelo	52
3.4.9	¿La configuración presenta inconsistencias?	52
3.4.10	Reportabilidad final.....	52
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	60
4.1	Análisis de los resultados de la investigación	60
4.1.1	Mejora en la productividad de los equipos.....	60
4.1.2	Cumplimiento de avances de frentes de preparación	63
4.1.3	Incremento de la producción de mineral de tajeos.....	64
4.2	Discusión de resultados	65
4.2.1	Incremento en el cumplimiento de los avances en preparación	66
4.2.2	Incremento en el cumplimiento de producción de tajeos	70
4.2.3	Impacto positivo en los Costos Operativos (OPEX)	74
4.3	Contrastación de hipótesis	75
	Conclusiones	81
	Recomendaciones	82
	Referencias bibliográficas.....	83
	Anexos	84

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2: Información equivalente en Simprep.	8
Tabla 3: Metros ejecutados de avances en preparación por mes.....	63
Tabla 4: Toneladas extraídas por mes.....	65
Tabla 5: Comparativo del desempeño operativo.....	75
Tabla 6: Comparativo de utilización de equipos.....	76
Tabla 7: Comparativo de productividad de equipos.....	77

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Funciones del Simprep.	6
Figura 2 : Flujo del Simprep.	7
Figura 3 : Precedencias.	9
Figura 4 : Ciclo de avance.	9
Figura 5 : Ciclo de producción.	10
Figura 6 : Avance por ciclo.	10
Figura 7 : Restricciones operacionales.	11
Figura 8 : Composición de turno.	11
Figura 9 : Mantenimiento de equipos.	12
Figura 10: Definición de equipos y factores.	13
Figura 11: Asignación de equipos.	13
Figura 12: Suministros a tareas.	14
Figura 13: Traslado de equipos a tareas.	15
Figura 14: Condiciones iniciales.	15
Figura 15: Flujo de proceso de gestión.	17
Figura 16: Secuenciamiento del minado.	18
Figura 17: Tareas del ciclo de avance.	19
Figura 18: Marcado de frente.	19
Figura 19: Carguío de explosivos.	20
Figura 20: Desate mecanizado.	21
Figura 21: Limpieza de frente.	21
Figura 22: Lanzado de shotcrete.	22
Figura 23: Instalación de malla y pernos.	23
Figura 24: Tareas del ciclo de producción.	23
Figura 25: Formas de desviación de los barrenos.	25
Figura 26: Carguío y voladura del tajeo.	25

Figura 27: Vista frontal y en planta de la tolva.....	26
Figura 28: Vista frontal y en planta de Tipo H.	26
Figura 29: Vista frontal y en planta de rampa de concreto.	27
Figura 30: Vista frontal y en planta de realce.	27
Figura 31: Tiempos de fraguado.	28
Figura 32: Secuencia de relleno en pasta tipo BFP.	28
Figura 33: Secuencia de relleno en pasta tipo SST.....	29
Figura 34: Secuencia de relleno detrítico.	29
Figura 35: Cronograma por guardia.	33
Figura 36: Actividades de la semana.	34
Figura 37: Densidad acumulada de la utilización del Scooptram.	35
Figura 38: Densidad acumulada de la productividad del Scooptram.	35
Figura 39: Análisis de ventana horaria del Scooptram.	36
Figura 40: Densidad acumulada de la utilización del Jumbo.	37
Figura 41: Densidad acumulada de la productividad del Jumbo.	37
Figura 42: Análisis de ventana horaria del Jumbo.....	38
Figura 43: Densidad acumulada de la utilización del Simba.....	39
Figura 44: Densidad acumulada de la productividad del Simba.	39
Figura 45: Análisis de ventana horaria del Simba.	40
Figura 46: Análisis de Pareto de desvíos del Scooptram.	41
Figura 47: Análisis de Pareto de desvíos del Simba.	41
Figura 48: Análisis de eficiencia global de equipos.	42
Figura 49: Distribución Lognormal de perforación de taladros largos.	43
Figura 50: Distribución Lognormal del Acarreo.	44
Figura 51: Distribución Normal del transporte.	45
Figura 52: Resumen de funciones Simprep.	46
Figura 53: Matriz de riesgos críticos	48
Figura 54: Algoritmo del modelo Simprep.	51

Figura 55: Plan operativo diario para estado de equipos.	53
Figura 56: Plan operativo diario para labores de avance.	55
Figura 57: Análisis de restricción operativa.	56
Figura 58: Reestructuración de la ventana horaria en el turno día.	57
Figura 59: Reestructuración de la ventana horaria en el turno noche.	58
Figura 60: Granularidad diaria de la productividad de equipos de acarreo.	60
Figura 61: Granularidad diaria de la productividad de equipos de perforación.	61
Figura 62: Granularidad diaria de la productividad de equipos de taladros largos.	62
Figura 63: Calibración semanal de avances pre-implementación del Simprep.	66
Figura 64: Calibración mensual acumulada de avances pre - implementación del Simprep.	67
Figura 65: Calibración semanal de avances post-implementación del Simprep.	68
Figura 66: Calibración mensual acumulada de avances post - implementación del Simprep.	69
Figura 67: Calibración semanal de producción de tajeos pre - implementación del Simprep.	70
Figura 68: Calibración mensual acumulada de producción de tajeos pre-implementación del Simprep.	71
Figura 69: Calibración semanal de producción de tajeos post - implementación del Simprep.	72
Figura 70: Calibración mensual acumulada de producción de tajeos post-implementación del Simprep.	73
Figura 71: Evolución del Opex por área de mejora - Cierre 2023.	74
Figura 72: Desempeño operativo pre y post implementación de Simprep.	76
Figura 73: Utilización de equipos pre y post implementación de Simprep.	76
Figura 74: Productividad de equipos pre y post implementación de Simprep.	77
Figura 75: Estadísticas para una muestra de la prueba T de student.	78
Figura 76: Prueba para una muestra de la prueba T- student.	78

Figura 77: Valor de T estadístico de prueba	79
Figura 78: Gráfica de prueba de la hipótesis.....	79

Introducción

En el contexto actual de la minería subterránea, el incremento sostenido de la productividad constituye un desafío crítico para asegurar la competitividad y sostenibilidad de las operaciones. En respuesta a esta necesidad, la aplicación de herramientas tecnológicas avanzadas se ha posicionado como un componente estratégico esencial para mejorar la eficiencia de los procesos, minimizar tiempos no productivos y asegurar un uso más eficaz de los recursos disponibles.

La presente tesis de investigación tiene como objetivo principal proponer una alternativa para el incremento de la producción en una operación minera subterránea, mediante la implementación de un software de simulación especializado. Esta herramienta permite modelar y analizar con mayor precisión las distintas operaciones unitarias del ciclo minero, brindando información valiosa para la toma de decisiones operativas y estratégicas.

Durante la ejecución de las operaciones mineras unitarias, se han identificado deficiencias en el cumplimiento de los avances programados, especialmente en la fase de preparación de labores. Esta etapa presenta demoras que impactan directamente en la habilitación oportuna de los frentes de minado, conocidos como tajeos. La carencia de acceso a estos tajeos afecta significativamente la programación y cumplimiento de los objetivos de producción, provocando una desconexión entre la planificación operativa y el pronóstico de producción (Forecast), así como una reducción en la eficiencia del uso de los recursos disponibles.

La aplicación de software de simulación permite detectar restricciones operativas, evaluar múltiples escenarios de operación y asignar los recursos de manera más eficiente, contribuyendo directamente a un mejor desempeño del sistema productivo. Este enfoque no solo apunta al incremento de la producción, sino también al fortalecimiento de la eficiencia operativa y a una planificación más precisa en el corto y mediano plazo.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El presente estudio se fundamenta en el análisis detallado de las operaciones unitarias, con el objetivo de profundizar en su comportamiento operativo y gestionar eficientemente los recursos disponibles, a fin de alcanzar altos niveles de cumplimiento en relación con el plan Forecast.

Para ello, se evaluó cada operación unitaria mediante el uso de un software de simulación, el cual permitió explorar diversos escenarios operativos. Esta herramienta facilitó la identificación del escenario más favorable para mejorar la secuencia del ciclo de minado, reducir los tiempos improductivos y elevar la eficiencia integral del sistema de producción.

1.2 Descripción del problema de investigación

Actualmente, la Unidad Minera que constituye el objeto de estudio presenta desviaciones respecto al cumplimiento del plan de producción, evidenciando bajos niveles de adherencia a los objetivos establecidos. Estas desviaciones se deben, principalmente, a la ejecución incompleta de los avances programados en labores de preparación, consecuencia de retrasos operativos originados por una inadecuada asignación y distribución de equipos. Esta situación se manifiesta en un exceso de horas improductivas, tales como tiempos de espera por disponibilidad de frentes de trabajo, traslados de maquinaria y otras demoras logísticas, lo que impide contar con una mina adecuadamente preparada, es decir tener tajos perforados listos para explotarlos y tenerlos como contingencia en caso ocurra casos atípicos ajenos a las operaciones.

Este contexto genera, en el corto plazo, incumplimientos en los cronogramas de avance y producción; mientras que, a mediano y largo plazo, impacta negativamente en los costos reales de operación y en la obtención de finos equivalentes de estaño proyectados en el presupuesto del Forecast.

1.2.1 Problema general

¿En qué medida el inadecuado análisis de las actividades unitarias incide en el incumplimiento de las metas de producción?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿En qué medida las falencias operativas inciden en los incumplimientos de los avances en preparación?
- ¿En qué medida las deficiencias en la utilización de los equipos Trackless inciden en los bajos rendimientos de las operaciones unitarias?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo que permita pronosticar y simular escenarios operativos confiables con la finalidad de incrementar la producción de mineral.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado operativo mediante el software de simulación para el cumplimiento de avances de frentes de preparación.
- Mejorar la utilización de los equipos Trackless mediante el software de simulación para el incremento de la productividad en las operaciones unitarias.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

Mediante la implementación del software Simprep se mejorará los procesos operativos el cual nos permitirá incrementar la producción de mineral.

1.4.2 Hipótesis específicas

- Mejorando el cumplimiento al programa de preparación nos brindará una mayor sostenibilidad en la planificación y secuenciamiento de minado.
- Mejorando la utilización de los equipos Trackless nos proporcionará una mayor productividad para conseguir los alcances estimados.

1.5 Variables

1.5.1 Variables dependientes

- Producción.
- Avances en preparación.
- Productividad.

1.5.2 Variable independiente

Software.

1.6 Antecedentes investigativos

Garrido E. (2017) en su tesis titulado “Simulación de nivel de producción Proyecto Nuevo Nivel Mina - Codelco Chile”, tiene como objetivo evaluar bajo el escenario planteado la capacidad productiva del manejo de minerales del nivel de producción para el Proyecto Nuevo Nivel Mina. Dicho proceso que incorpora desde la carga de mineral por equipos LHD los cuales son semiautónomos desde los puntos de extracción hasta la descarga en los piques de traspaso que conectan con el nivel de transporte intermedio, mediante el software de simulación de eventos discretos el cual le permita evaluar la capacidad productiva del sistema para el plan de producción correspondiente al año 2031, identificar cuellos de botellas del proceso e identificar oportunidades de mejora del proceso evaluado.

Huaynate H. (2018) en su tesis “Aplicación de mejora continua en la gestión del planeamiento operativo minero y su influencia en el beneficio económico mina Untuca – Cori Puno S.A.C” tiene como objetivo, incrementar el Beneficio Económico de una operación minera marginal mixta subterránea y superficial, aplicando procesos de mejora continua en la Gestión del planeamiento operativo minero. Además de gestionar el Planeamiento Operativo Minero con todos los recursos e indicadores de minado optimizados, estimando el costo asociado de cada parámetro de productividad del proceso de mejora continua en el modelo matemático de función potencial denominado curva de aprendizaje de estimación de costos.

Pesantes L. (2023) en su tesis “Evaluación de los tiempos de perforación y su relación con la productividad de un equipo de perforación tipo jumbo” tiene como objetivo llevar a cabo un análisis técnico de los equipos de perforación y rezagado con los que se cuenta actualmente y, a partir de esto, realizar el cálculo de los equipos que harán falta para satisfacer las necesidades futuras de producción en la unidad. Una vez que se ha realizado este cálculo, se hizo un análisis económico para conocer la viabilidad del proyecto. Por último, propone un plan de mantenimiento, tanto para los equipos actuales como para los propuestos, todo ello con el fin de hacer más eficiente el proceso productivo.

Tabla 1

Matriz de consistencia.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables dependientes	Variables independientes		
¿En qué medida el inadecuado análisis de las actividades unitarias incide en el incumplimiento de las metas de producción?	Desarrollar un modelo que permita pronosticar y simular escenarios operativos confiables con la finalidad de incrementar la producción de mineral.	Mediante la implementación del software Simprep se mejorará los procesos operativos el cual nos permitirá incrementar la producción de mineral.	Producción	Software	Producción (tn) Adherencia (%) Cumplimiento (%)	Enfoque: Cuantitativo
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específica	Variables dependientes	Variables independientes		Tipo: Aplicada
¿En qué medida las falencias operativas inciden en los incumplimientos de los avances en preparación?	Diagnosticar el estado operativo mediante el software de simulación para el cumplimiento de avances de frentes de preparación.	Mejorando el cumplimiento al programa de preparación nos brindará una mayor sostenibilidad en la planificación y secuenciamiento de minado.	Avances en preparación	Software	Adherencia (%) Cumplimiento (%)	Método: Analítico – descriptivo Alcance: Correlacional – explicativo
¿En qué medida las deficiencias en la utilización de los equipos Trackless inciden en los bajos rendimientos de las operaciones unitarias?	Mejorar la utilización de los equipos Trackless mediante el software de simulación para el incremento de la productividad en las operaciones unitarias.	Mejorando la utilización de los equipos Trackless nos proporcionará una mayor productividad para conseguir los alcances estimados.	Productividad	Software	Producción (3600 tn/d) Avances en preparación (50 m/d) Productividad: (98 tn/h, tajeos: 74 m/h y frentes: 25 m/h) Utilización (68%)	Diseño: No experimental, longitudinal y aplicado.

Fuente: Elaboración propia..

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

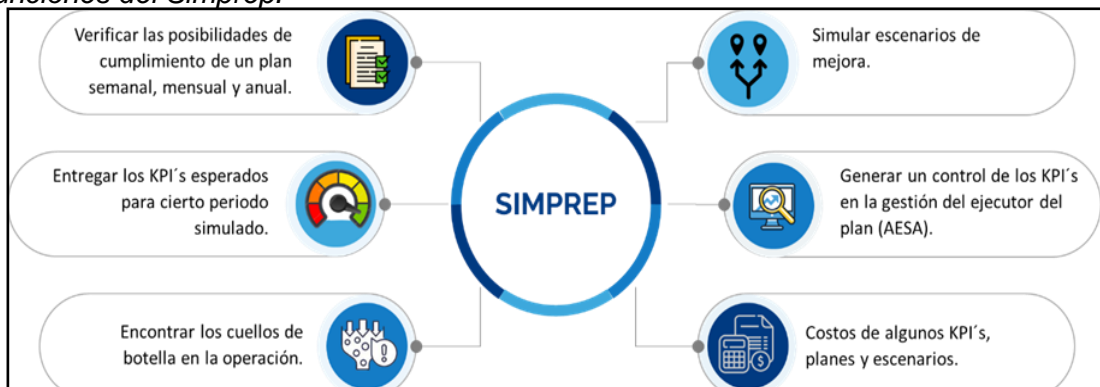
2.1 Marco teórico

2.1.1 Simulación Simprep

Mohana V. (2023) Reporte técnico Simprep. Es un software utilizado para apoyar al proceso de la planificación de la preparación y desarrollos mineros en el corto y mediano plazo, integrando máximos potenciales basados en simular la interacción entre áreas de trabajo, tareas de preparación y los recursos. Además es capaz de evaluar métricas de desempeño de la programación, al cargar una proyección de avance planificada y comparar con los resultados obtenidos como, por ejemplo, verificar el cumplimiento en función de los Key Value Drives o KVD (metros de avance, horas operativas, entre otros), generando una programación dinámica del turno a turno, con las áreas de trabajos y sus restricciones de precedencia, la secuencia de tareas realizadas dentro de éstas, teniendo presente el orden y la duración de cada una, tomando como fundamento las capacidades de los equipos con lo que cuenta dicha operación minera, se evidencia en la siguiente figura las funciones del Simprep.

Figura 1

Funciones del Simprep.



Fuente: Mohana V. (2023) Reporte técnico Simprep.

El flujo que se debe llevar para cumplir estas funciones es:

- **Recopilación de información:**

El cual se realizará mediante el reporte de turno o el análisis estadístico realizado por mina.

- **Análisis estadístico:**

La información recopilada en el punto anterior, debe ser analizada con el fin de producir inputs legibles para el software, en este punto se generan las primeras alertas de desempeño; en este punto se definen los tiempos de inicio de turno, fin de turno, interferencias, otros; la simulación de Simprep depende en gran medida de este punto.

- **Simulación en Simprep:**

Una vez analizados los datos, se realiza la configuración en Simprep, realizada por los encargados de planificar para su respectiva simulación.

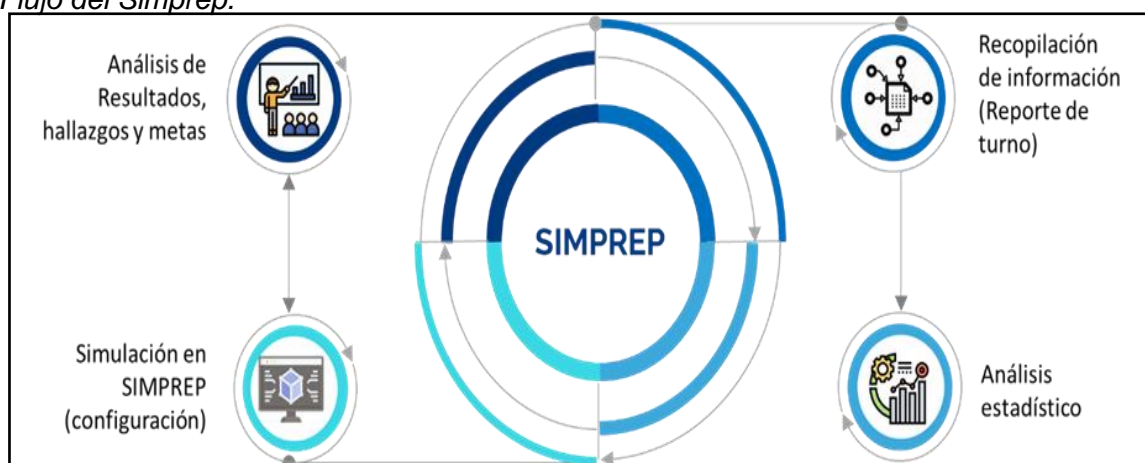
- **Análisis de resultados:**

Se debe resumir la simulación en formato Power Bi definiendo las principales causas del no cumplimiento, hallazgos más importantes y posibles metas para mejorar el desempeño. En este punto se deben realizar escenarios de mejora en los cuales se define que optimizar. Se simula y se ve como impacta este cambio a nivel de costos y KPI's.

En la siguiente figura se evidencia el flujo de las funcionalidades del Simprep.

Figura 2

Flujo del Simprep.



Fuente: Mohana V. (2023) Reporte técnico Simprep.

El software Simprep se alimenta de un plan, ya sea anual, mensual, semanal o diario, para simular se requiere inputs los cuales están contenidos en la siguiente tabla:

Tabla 2*Información equivalente en Simprep.*

ÍTEM	COMPONENTES	HOJA
1	Plan de avances y producción	Importar
		Hitos plan
2	Precedencias	Propiedades
3	Ciclo de operaciones unitarias detallado por tipo de labor	Definir secuencias
4	Ciclo de producción y relleno	Definir secuencias
5	Avance por disparos, por labor y sección	Definir secuencias
6	Restricciones operacionales	Definir tareas y otras
7	Composición de turno	Calendario
8	Factores operacionales de equipos	Definir equipos
		Capacidades
		Mantenciones
9	Asignación de equipos	Asignar
10	Cubicación de suministros por tipo de labor y sección	Definir recursos
		Suministros
		Interferencias
11	Tiempo de traslado de equipos entre labores	Definir equipos
12	Condiciones iniciales	Condiciones iniciales

Fuente: Mina en estudio.

2.1.1.1 Plan de avances y producción. Se debe ingresar información sobre la identificación de las labores que se realizarán en el plan, incluyendo detalles como el nombre de la labor, su tipo, la sección, la cantidad de toneladas que se procesarán, la ley del mineral, entre otros datos relevantes. Esta información es esencial para poder ejecutar el Simprep; una planificación adecuada y detallada del proyecto, lo que permitirá su correcta ejecución en términos de tiempo, recursos y calidad.

Además, el plan de avances y producción es fundamental para poder llevar un seguimiento del progreso del proyecto y poder hacer ajustes en caso de ser necesario para cumplir con los objetivos establecidos.

2.1.1.2 Precedencias. Las precedencias son esenciales para el plan de avances y producción en Simprep, ya que establecen el orden lógico en el que se deben realizar las labores en el plan. Sin ellas, no se puede ingresar un plan, ya que las precedencias

funcionan como un mecanismo de bloqueo y desbloqueo de las labores a medida que se avanza en la ejecución del plan, en la siguiente figura se presenta lo mencionado.

Figura 3

Precedencias.

Área de trabajo	Predecesores	Procesar predecesores con disyunción (operador lógico O)	Propiedades roca	Orientación eje X	Orientación eje Y	Orientación eje Z	Color
RP952NE		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000217
CM965NE	RP952NE	<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000228
CR342NW		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000235
SN438NW	CR342NW	<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000237
SN438SE	SN438SE	<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000238
SN373SE		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000241
BP210SW		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000244
SN041SE		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000247
CM472NE		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000249
VE471NW		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000254
SN629SE		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000260
SN517NW		<input type="checkbox"/>	...	1	0	0	#000261

Fuente: Software Simprep.

2.1.1.3 Ciclo de operaciones unitarias detallado por tipo de labor. Los ciclos de las operaciones unitarias son fundamentales para el correcto funcionamiento de Simprep, ya que en ellos se detallan las tareas que se realizan en cada una de las labores, así como su duración y el avance que se logra por cada ciclo de tareas realizado. Es importante tener en cuenta que la información registrada en los ciclos de operación debe ser precisa y actualizada regularmente para garantizar la exactitud de la simulación y evitar errores en la planificación, en las siguientes figuras se presenta lo mencionado.

Figura 4

Ciclo de avance.

Orden	Tareas	Equipos	Tiempo Rp(-)[5.0x4.5]	Avances						
				rucero-Galeria(4.5x4.0)	Cámara(4.0x4.0)	Cámara(3.5x3.5)	Subnivel(4.0x4.0)	Subnivel(3.5x3.5)	Cámara(2.0x2.0)	
1	Marcación de frente	Geólogos	H	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
2	Limpieza piso antes de la perforación	Scoop	H	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
3	Perforación de la Avance	Jumbo	H	3.96	3.42	3.42	4.86	2.88	3.96	1.8
4	Carguo	Cuadrilla y anfoloader	H	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.5
5	Voladura	-	H	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
6	Ventilación	-	H	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	Chequeo de gases	-	H	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
8	Desate	Scaler	H	1.95	1.80	1.80	1.80	1.65	1.65	1.05
9	Limpieza de Frente	Scoop	H	4.60	3.89	3.65	4.11	3.26	3.63	1.54
10	Topografía	Topógrafos	H	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3
11	Perforar de pernos de fortificación	Empernador	H	1.40	1.20	1.70	1.60	1.60	1.40	0.90
12	Instalación de pernos	Empernador	H	1.24	0.93	1.40	1.09	1.09	1.09	0.47
13	Lechado de pernos	-	H	1.6	0	0	0	0	0	0
14	Instalación de malla	Cuadrilla y Manitou	H	0	1.4	1.4	1.3	1.2	0	0.6
15	Shotcrete	Robot - Mixer	H	1.64	1.23	1.23	1.23	1.23	1.02	0.82
16	Fraguado	-	H	2	2	2	2	2	2	2
17	Housekeeping	Manitou	H	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
			Total	23	20	21	22	19	18	12

Fuente: Software Simprep.

Figura 5

Ciclo de producción.

Producción				
Orden	Tareas	Equipos	Tiempo	Producción
1	Limpieza de mineral	Scoop	H	6
2	Perforación Vertical	Simba	H	6
3	Levantamiento de taladros	Simba	H	0.5
4	Carguío	-	H	2.3
5	Voladura	-	H	0.5

Fuente: Software Simprep.

Figura 6

Avance por ciclo.

Nombre secuencia	Avance por ciclo según tipo de roca	Distribución Avance ciclo por defecto	Par1 Avance ciclo por defecto	Par2 Avance ciclo por defecto	Par3 Avance ciclo por defecto	Mínimo Avance ciclo por defecto	Máximo Avance ciclo por defecto
PRODUCCION+CAR...	...	Constante	0.1	0	0	0	0.1
Rp()(5.0x4.5)	...	Normal	3.31	0.15	0	3.1	3.5
CruceroGaleria(4.5x4.0)	...	Normal	3.5	0.5	0	3.3	4.3
Camara(4.0x4.0)	...	Constante	3.9	0	0	2.7	5.2
Camara(3.5x3.5)	...	Constante	3.4	0	0	3	4.3
Subnivel(4.0x4.0)	...	Constante	3.9	0	0	2.7	5.2
Subnivel(3.5x3.5)	...	Constante	3.8	0.2	0	3	4.2
Camara(2.0x2.0)	...	Constante	2	0	0	0	2
Desquinche	...	Constante	2.1	0	0	0	2.1
RB	...	Constante	8	0	0	0	5
RD	...	Constante	41	0	0	0	41

Fuente: Software Simprep.

Es importante mencionar que las figuras 4, 5 y 6 incluyen algunos ejemplos de ciclos que fueron calculados en base a los registros operacionales. Sin embargo, es importante señalar que estos tiempos de ciclos pueden no incluir todas las operaciones.

Como parte del sistema de gestión, se estipuló que los parámetros incluidos en estas figuras deben ser revisados periódicamente, con una frecuencia mínima de un mes.

2.1.1.4 Ciclo de producción y relleno. El cual comprende una secuencia de operaciones unitarias destinadas a la extracción eficiente del mineral y a la restitución del soporte geomecánico del macizo rocoso.

2.1.1.5 Avance por disparos, por labor y sección. El cual comprende el desarrollo progresivo de las labores mineras, garantizando el acceso a zonas mineralizadas y facilitando la infraestructura para el sostenimiento, ventilación, drenaje y transporte de mineral.

2.1.1.6 Restricciones operacionales. Son factores muy críticos para considerar, ya que al realizar una simulación en Simprep, aunque no se encuentran explícitamente incluidas en una hoja específica. Algunos ejemplos de estas restricciones pueden ser horarios específicos de voladura, limitaciones de acceso para ciertos equipos en algunas labores o cambios en el método de minado para determinados tajos. Por lo tanto, es crucial considerar estas restricciones para asegurar una simulación precisa y fiable en Simprep, en la siguiente figura se presenta lo mencionado.

Figura 7

Restricciones operacionales.

Nombre	Nombre largo	Inicio de turno	Fin de turno	Permite ejecución parcial	Permite postergar ejecución	Disparo	Avance parcial inmediato	Independien de ciclo	Sin restricción horarios	Cantidad máxima por turno	Color
VEN	VENTILACION	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#A8FF9
D	DESATE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#FFF80
TOPO	TOPOGRAFIA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#80FF80
LF	LIMPIEZA_FRENTE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#0080FF
GGRMPS	CHEQUEO_GASES_RE...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#FF80C0
MF	MARCACIONFRENTE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#FF80FF
LPP	LIMPIEZA_PISO_PREPE...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#E2EDD3
PF	PERFORACION_FRENTE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#00B9B9
C	CARGUIO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#FFAEAE
M	Malla	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#DDA522
PP	PERFORAR_PERNOS_F...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#2D8CF7
IP	INSTALACION_PERNOS	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#CCCB85
LP	LECHADO_PERNOS	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#A7C0D8
SH	SHOTCRETE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#00FFFF
O	HOUSEKEEPING_FREN...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#80FF80
V	VOLADURA	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#FF6868
FR	FRAGUADO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0	#8000FF
LM	LIMPIEZA_MINERAL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#CCE92C
PV	PERFORACION_VERTIC...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#FCC2DE
RD	RELLENO DESMONTE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	#F4822D

Fuente: Software Simprep.

2.1.1.7 Composición de turno. La composición de turno es un factor crucial para considerar en la simulación, ya que incluye tiempos que afectan directamente la disponibilidad y utilización de los equipos. Es importante mencionar que la simulación debe incluir las horas de inicio y fin de turno, ya que durante estos períodos no se pueden realizar actividades que involucren el uso de equipos, además incluye la cantidad de turnos por día y la duración total de estos turnos. En la siguiente figura se presenta lo mencionado.

Figura 8

Composición de turno.

	Etiqueta período	Horas por turno	Horas para tarea inicio de turno	Horas para tarea fin de turno	Horas entre turnos	Periodo discreto
1	Dia	12	2	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Noche	12	2	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente: Software Simprep.

2.1.1.8 Factores operacionales de equipos. La inclusión de los factores operacionales de los equipos es esencial en la simulación, ya que puede haber una gran variación en los resultados según la disponibilidad de éstos. Por ejemplo, simular un jumbo con una disponibilidad del 65% versus uno con una disponibilidad del 95% puede tener un impacto significativo en los resultados de la simulación.

Para abordar este problema, en la hoja de mantenimiento se pueden especificar factores como la frecuencia y duración de las mantenciones, lo que permitirá simular el impacto que tienen estas actividades en la disponibilidad de los equipos.

Es importante destacar que el calendario de mantenimiento puede afectar significativamente la capacidad de producción y el rendimiento de los equipos, por lo que su inclusión es crucial en la simulación.

Además de los factores operacionales y de mantenimiento, también es importante incluir la cantidad y características de los equipos en la simulación. Esto incluye la cantidad de equipos presentes en la mina, así como sus atributos específicos, como la capacidad de carga en yardas cúbicas de los scoop y la cantidad de brazos de los jumbos.

En las figuras 7 y 8 se muestran las formas de ingreso al Simprep de los parámetros anteriormente mencionados, como la cantidad de equipos disponibles, así como sus atributos. Es importante tener en cuenta que también se debe incluir el tiempo promedio de traslado de cada equipo hacia otra labor, ya que es un tiempo en el cual no se puede realizar ninguna tarea adicional, en las siguientes figuras se presenta lo mencionado.

Figura 9

Mantenimiento de equipos.

Nombre	Equipos	Medir tiempo según	Par1 Tiempo al Ter fallo	Par2 Tiempo al Ter fallo	Distribución Tiempo entre fallos	Par1 Tiempo entre fallos	Par2 Tiempo entre fallos	Par3 Tiempo entre fallos	Min Tiempo entre fallos	Max Tiempo entre fallos	Distribución Duración mantenimiento	Par1 Duración mantenimiento	Par2 Duración mantenimiento
MP1	...	Tiempo c...	5	12	Normal	47	0	0	0	50	Normal	4	3
MP2	...	Tiempo c...	18	12	Normal	48	0	0	0	50	Normal	4	3.5
MNP1	...	Tiempo c...	12	24	Normal	24	12	0	0	50	Normal	1.4	0.5
MNP2	...	Tiempo c...	13	24	Normal	24	12	0	0	50	Normal	1.3	0.5
		Tiempo c...	10	0	Normal	0	0	0	0	0	Normal	0	0

Fuente: Software Simprep.

Figura 10

Definición de equipos y factores.

Recurso	Equipo	Factor eficiencia equipo	Horómetro inicial equipo	Tiempo cambio de área trabajo por defecto	Perfil de tiempo de traslado
EMPERNADOR	EM-2	1	8	0.5	
EMPERNADOR	EM-3	1	6.7	0.5	
EMPERNADOR	EM-4	1	0.5	0.5	
JUMBO	JF-1	1	2.7	0.5	
JUMBO	JF-2	1.5	6.5	0.5	
JUMBO	JF-3	1	4	0.5	
JUMBO	JF-4	1	1.9	0.5	
ROBOT	RB-1	1	9.7	0.25	
ROBOT	RB-2	1	1.1	0.25	
SCALER	SP-1	1	3.3	0.5	
SCALER	SP-2	1	1.3	0.5	
SCALER	SP-3	1	3.6	0.5	
SCOOP	SC-1	1	0.4	0.25	
SCOOP	SC-2-6Y	1.4	1.3	0.25	
SCOOP	SC-3-6Y	1.4	4.9	0.25	
SCOOP	SC-4	1	9.1	0.25	
SCOOP	SC-5-6Y	1.4	4.8	0.25	
SCOOP	SC-6	1	9.7	0.25	
SCOOP	SC-7	1	6	0.25	

Fuente: Software Simprep.

2.1.1.9 Asignación de equipos. Una vez que se han definido todos los parámetros operacionales de los equipos en la simulación, es necesario asignar cada equipo a su tarea específica, como el jumbo para perforación de frentes, los Scooptram para la limpieza de frentes y tajeos, y los equipos de mina como el simba para perforación vertical. Luego, es importante asignar los equipos a determinados sectores dentro de la mina, como niveles o áreas específicas, para que sepan dónde deben trabajar.

Finalmente, se deben asignar los equipos a las frentes de trabajo específicas, asegurándose de que cada equipo esté asignado a la tarea correcta en el lugar correcto. Esto es fundamental para garantizar que la simulación sea lo más precisa y realista posible, en la siguiente figura se presenta lo mencionado.

Figura 11

Asignación de equipos.

Recurso/Tarea	VEN	D	TOPO	LF	CGRMPS	MF	LPP	PF	C	M	PP	IP
► CUADRILLA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
EMPERNADOR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
JUMBO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ROBOT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SCALER	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SCOOP	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
SIMBA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Geologos	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
RAISEBORING	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MANITOU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Fuente: Software Simprep.

2.1.1.10 Cubicación de suministros por tipo de labor y sección. Es necesario incluir los suministros consumidos por cada tarea en la simulación. Por ejemplo, el carguío de explosivos consume explosivos y la instalación de pernos consume pernos. Cada uno de estos suministros se debe ingresar al software por metro lineal, es decir, la cantidad de pernos por metro de avance lineal y la cantidad de malla por metro lineal.

En el caso de la producción, se debe ingresar la cantidad de explosivos consumidos por tonelada de mineral producido. Este paso es importante para tener un registro detallado del consumo de suministros y para generar kpi's que permitan monitorear el cumplimiento de los planes y la eficiencia en la utilización de los recursos, en la siguiente figura se presenta lo mencionado.

Figura 12

Suministros a tareas.

Suministros Interferencias										
	Secuencia	Tarea	Aceros(Brocas)	Explosivos(Kg)	Pernos(und)	Malla(m2)	Shotcrete(m2)	Metros perforados	TonCiclo	Metros_caralib
	Rp(5.0x4.5)	LF	0	0	0	0	0	0	34	0
	Rp(5.0x4.5)	CGRMPS	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	MF	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	LPP	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	PF	0.37	0	0	0	0	67	0	0
	Rp(5.0x4.5)	C	0	47	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	M	0	0	0	15	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	PP	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	IP	0	0	11	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	LP	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	SH	0	0	0	0	13	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	O	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	V	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	FR	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	LM	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	PV	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	RD	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rp(5.0x4.5)	CP	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Software Simprep.

2.1.1.11 Tiempo de traslado de equipos entre labores. Es fundamental considerar el tiempo de traslado de los equipos entre labores. Como se mencionó previamente en el punto 8, es esencial incluir los tiempos de traslado de cada equipo en la simulación, ya que este tiempo es considerado como tiempo muerto, en el cual no se pueden realizar tareas productivas.

De esta forma, se puede tener una estimación precisa del tiempo total requerido para completar una tarea y se pueden identificar oportunidades para mejorar la eficiencia en la gestión del tiempo de traslado de los equipos, en la siguiente figura se presenta lo mencionado.

Figura 13

Traslado de equipos a tareas.

Recurso	Equipo	Factor eficiencia equipo	Horómetro inicial equipo	Tiempo cambio de área trabajo por defecto	Perfil de tiempo de traslado
CUADRILLA	CU-1	1	9.3	0	
CUADRILLA	CU-2	1	3.6	0	
CUADRILLA	CU-3	1	1.6	0	
CUADRILLA	CU-4	1	3.1	0	
CUADRILLA	CU-5	1	2	0	
EMPERNADOR	EM-1	1	0.3	0.5	
EMPERNADOR	EM-2	1	8	0.5	
EMPERNADOR	EM-3	1	6.7	0.5	
EMPERNADOR	EM-4	1	0.5	0.5	
JUMBO	JF-1	1	2.7	0.5	
JUMBO	JF-2	1.5	6.5	0.5	
JUMBO	JF-3	1	4	0.5	
JUMBO	JF-4	1	1.9	0.5	
ROBOT	RB-1	1	9.7	0.25	
ROBOT	RB-2	1	1.1	0.25	
SCALER	SP-1	1	3.3	0.5	
SCALER	SP-2	1	1.3	0.5	
SCALER	SP-3	1	3.6	0.5	
SCOOP	SC-1	1	0.4	0.25	
SCOOP	SC-2-6Y	14	1.3	0.25	

Fuente: Software Simprep.

2.1.1.12 Condiciones iniciales. Las condiciones iniciales son importantes de incluir en la simulación siempre que se planea simular un plan que no comience desde cero en el primer día. En esta sección se debe detallar la labor y la cantidad de metros o tonelaje que ya se ha avanzado hasta la fecha, así como la última tarea realizada.

Esto es especialmente relevante en ciclos de producción que pueden tener tareas de larga duración, ya que comenzar la simulación sin esta información podría resultar en una cantidad de tonelaje o número de disparos inexacta, lo que no reflejaría la realidad de la operación minera, en la siguiente figura se presenta lo mencionado.

Figura 14

Condiciones iniciales.

Áreas de trabajo	Avance inicial	Secuencia	Tarea	Tiempo
TJ609SS+4260	600	PRODUCC...	LM	0
TJ678EW4150	200	PRODUCC...	LM	2
TJ609SS+4150	200	PRODUCC...	LM	2
TJ610SS+4030	200	PRODUCC...	LM	2

Fuente: Software Simprep.

2.1.2 Flujo del proceso de gestión

Mohana V. (2023) Reporte técnico Simprep. El sistema busca habilitar un enfoque de planificación dinámica, permitiendo así que el plan se retroalimente de los resultados

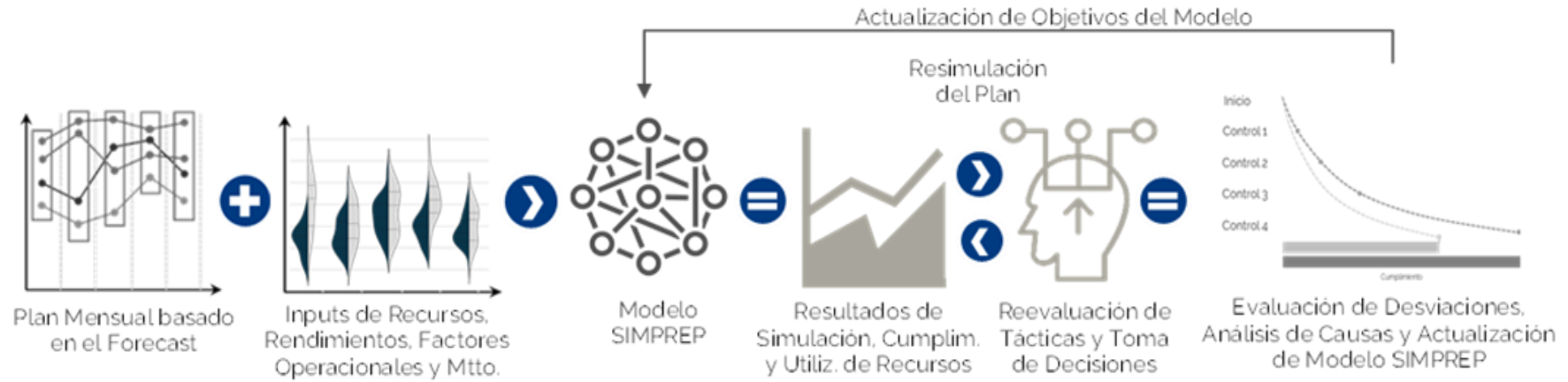
obtenidos en un horizonte de tiempo previo (mientras menor el horizonte mejor). El flujo del proceso de gestión propuesto se resume en:

- Definición de un plan mensual basado en el horizonte inmediato superior (Forecast)
- Gestión de inputs en función al desempeño de los últimos tres meses.
- Modelamiento y Simulación.
- Evaluación de resultados y toma de decisiones en función al cumplimiento del plan.
- Resimulación del plan incluyendo tácticas habilitadas.
- Análisis de causas de no cumplimiento y secuenciamiento de retrasos.

A continuación, se presenta el flujo del proceso de gestión en la siguiente figura:

Figura 15

Flujo de proceso de gestión.



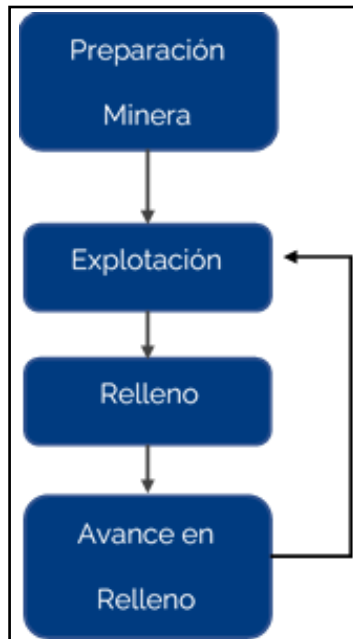
Fuente: Mohana V. (2023) Reporte técnico Simprep.

2.1.3 Secuencia de minado global

Minsur (2023) Plan de minado. La secuencia de minado en la operación subterránea está dada por el método de minado, los cuales cumplen una secuencia operativa, que conllevan a obtener los resultados previstos teniendo en consideración la seguridad y el costo de minado. A continuación, se presenta el secuenciamiento de minado en la siguiente figura.

Figura 16

Secuenciamiento del minado.



Fuente: Minsur (2023) Plan de minado.

2.1.3.1 Preparación. En esta etapa se desarrollan labores horizontales o verticales siguiendo la estructura de la veta o cuerpo que permiten y pueden ser paralelos a los desarrollos como la preparación de blocks de mineral que conformarán las zonas de explotación y las labores de preparación están conformadas por chimeneas y subniveles.

2.1.3.2 Explotación. En esta etapa se extrae en forma sistemática el recurso mineral preparado y cubicado en las zonas de trabajo llamados tajeos.

2.1.3.3 Relleno. En esta etapa se realiza la sustitución del material con el mineral explotado el cual tiene como función recuperar la estabilidad perdida del macizo rocoso, como producto de la extracción del mineral valioso.

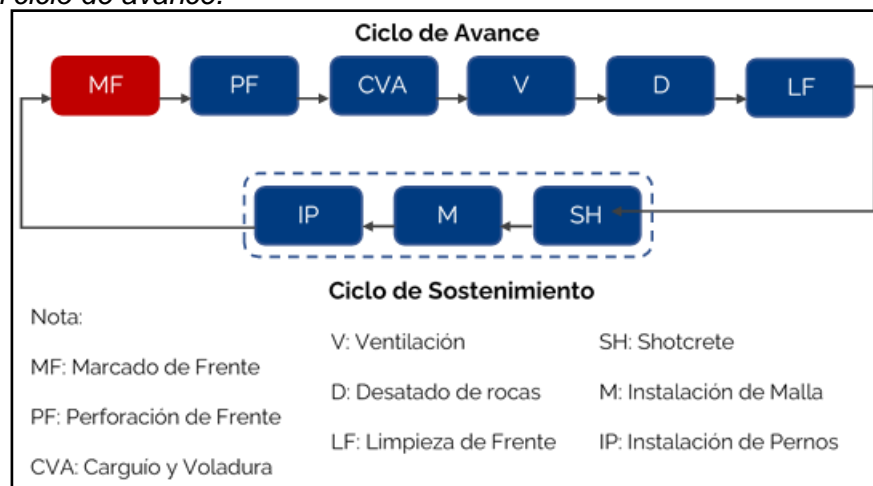
2.1.3.4 Avance en relleno. En esta etapa se realiza la rehabilitación en el nivel superior y/o nivel inferior para proceder al minado.

2.1.4 Ciclo de avance

Minsur (2023) Plan de minado. Durante el ciclo de avance, se determinan nueve tareas que conforman la secuencia, con una duración total de 10 horas. Para ello, se emplea una flota compuesta por 8 jumbos, 9 scoops, 3 scalers, 1 robot, 6 empernadores y 2 mixers.

Figura 17

Tareas del ciclo de avance.



Fuente: Minsur (2023) Plan de minado.

2.1.4.1 Marcado de frente. En esta tarea la cual es realizada por el área de topografía, en el cual se desarrolla el marcado de cola, la dirección para los próximos frentes de avance. Además de marcar la gradiente para controlar la sobre-excavación.

Figura 18

Marcado de frente.



Fuente: Mina en estudio.

2.1.4.2 Perforación de frente. Esta actividad se lleva a cabo con el propósito de crear galerías en la formación rocosa, con una disposición y forma apropiada para albergar los explosivos. La perforación se ejecuta utilizando equipos que combinan la percusión y la rotación, lo que resulta en la fragmentación de la roca.

2.1.4.3 Carguío y voladura. Se refiere al proceso de introducir explosivos en los taladros previamente perforados en la roca con el fin de fragmentarla y facilitar su extracción. Este proceso se realiza de manera cuidadosa y controlada para garantizar la seguridad de los trabajadores y la eficiencia en la voladura.

Figura 19

Carguío de explosivos.



Fuente: Mina en estudio.

2.1.4.4 Ventilación. Se refiere al proceso de control y gestión del aire dentro de una mina subterránea, este proceso implica la circulación de aire fresco desde la superficie hasta el interior de la mina, la eliminación de gases y partículas contaminantes, y la regulación de la temperatura y humedad ambiental.

2.1.4.5 Desatado de rocas. Se refiere al proceso de remover o desprender rocas sueltas, inestables o sobrecargadas que representan un riesgo para la seguridad de los trabajadores o para el avance de las operaciones mineras. El objetivo principal del desatado de rocas es garantizar un entorno de trabajo seguro y estable en la mina, minimizando el riesgo de accidentes por caída de rocas.

Figura 20

Desate mecanizado.



Fuente: Mina en estudio.

2.1.4.6 Limpieza de frente. Se refiere al proceso de eliminar los materiales sueltos, residuos y obstáculos que se acumulan en el área de trabajo, especialmente en la cara de avance donde se está llevando a cabo la extracción del mineral. Esta actividad es esencial para mantener un entorno de trabajo seguro y productivo en el interior de la mina, facilitando el acceso de los trabajadores y el equipo a la zona de extracción, así como también permitiendo una operación eficiente de la maquinaria minera.

Figura 21

Limpieza de frente.



Fuente: Mina en estudio.

2.1.4.7 Shotcrete. En esta actividad se realiza el proceso de aplicación de concreto proyectado o lanzado a alta presión sobre las superficies de los hastiales y la corina con el fin de estabilizarlas y proporcionar refuerzo estructural. Este proceso implica el uso de una mezcla de cemento, agregados y agua que se aplica mediante una boquilla especial conectada a una máquina de proyección de concreto.

Figura 22

Lanzado de shotcrete.



Fuente: Mina en estudio.

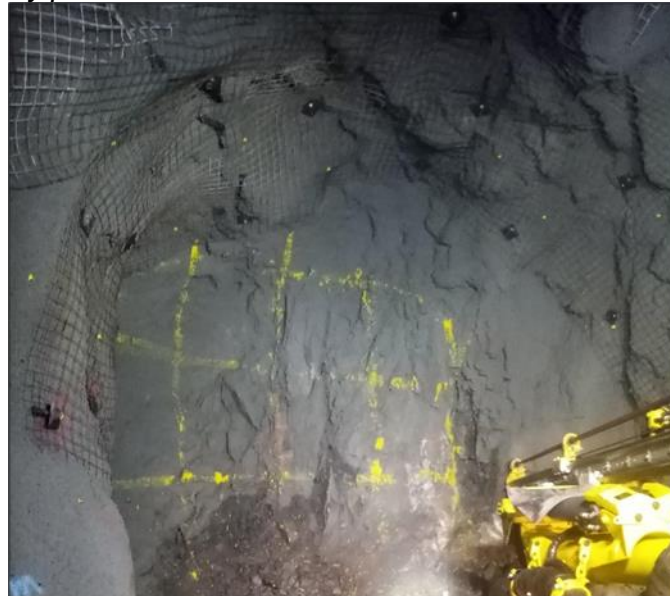
2.1.4.8 Instalación de malla y pernos. Este proceso se lleva a cabo utilizando equipos especializados que perforan agujeros en la roca y colocan pernos de anclaje para asegurar la malla de sostenimiento en los hastiales y corona. Esta malla actúa como un revestimiento protector que ayuda a prevenir el desprendimiento de rocas y asegura la integridad estructural de los frentes de avances. La instalación de malla y pernos es una práctica estándar en la minería subterránea para mitigar los riesgos asociados con la actividad minera y garantizar un entorno de trabajo seguro y productivo.

Parámetros para considerar:

- Relación: 2 cartuchos de resina x 7 cartuchos de cemento.
- Pernos: 7 pies x (22 mm o 19 mm).
- Presión: 9 bar a 12 bar.
- Cocada: 10 cm x 10 cm x 2.4 m.
- Cocada en intersecciones: 5 cm x 5 cm x 2.4 m.
- Traslape entre paños de malla, extremos a los hastiales y frente: 30 cm

Figura 23

Instalación de malla y pernos.



Fuente: Mina en estudio.

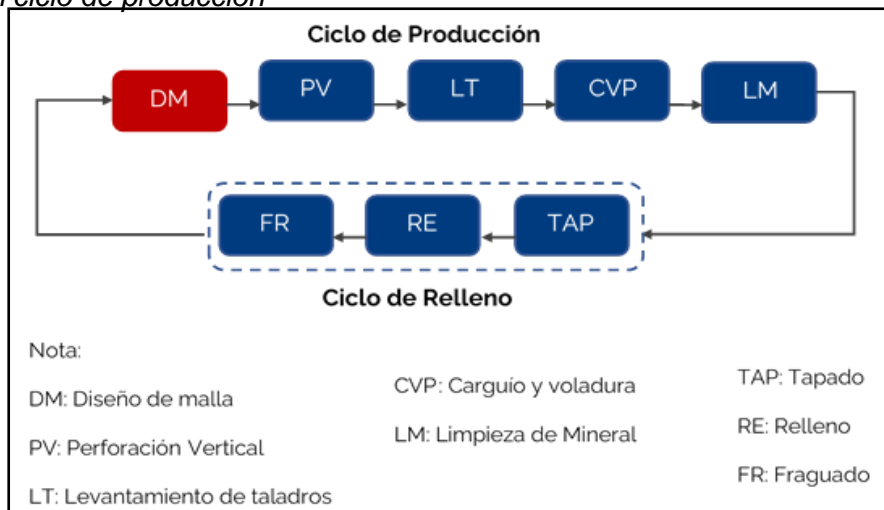
2.1.5 Ciclo de producción

Minsur (2023) Plan de minado. Durante el ciclo de producción, se determinan cinco tareas que conforman la secuencia, con una duración total de 16 horas. Para ello, se emplea una flota compuesta por 8 simbas y 6 scoops. En términos de producción, se alcanzan 270 toneladas por ciclo en vetas y 450 toneladas en cuerpos.

Posteriormente se realiza el secuenciamiento del relleno el cual está definido por las siguientes 3 tareas; tapado, relleno y fraguado.

Figura 24

Tareas del ciclo de producción



Fuente: Minsur (2023) Plan de minado.

2.1.5.1 Diseño de malla. En esta tarea se realiza previamente la ubicación y verificación del tajo, para luego realizar las proyecciones de las secciones en CAD, en el cual se realiza la consideración de taladros de alivio y 2 secciones para taladros de barrera. Finalmente se realiza la proyección de las secciones en ARGIS con la finalidad de que se encuentren dentro de la zona mineralizada.

Debemos tener en cuenta que la malla de perforación varía de acuerdo con la potencia de la mineralización y del equipo de taladros largos, el rango del burden es para cuerpos (1.0-2.5) y para vetas es (0.8-1.3) metros.

2.1.5.2 Perforación vertical. En esta tarea, se efectúa la perforación mediante el uso de taladros largos, siendo la tarea principal en el tajeo por subniveles. Previo al inicio de la perforación, se demanda un riguroso control y precisión, los cuales son elementos determinantes para alcanzar una voladura eficiente y óptima. La utilización de diámetros más pequeños y longitudes mayores en los taladros esencialmente provoca la desviación de este, lo cual constituye un inconveniente habitual pero manejable dependiendo de la calidad de la formación rocosa.

2.1.5.3 Levantamiento topográfico. En esta tarea se realiza el levantamiento de los taladros para medir la desviación de éstos. En caso se obtenga taladros correctos, se procede a tapar los taladros para evitar que se obstruyan y no se pierda tiempo en el momento del carguío con explosivo de los taladros, caso contrario se obtenga taladros desviados, se procede a realizar un nuevo diseño y a perforar el taladro corregido, con la finalidad de asegurar la salida de los taladros hacia la cara libre y que no genere mayor dilución.

Figura 25

Formas de desviación de los barrenos.



Fuente: Guerrero (2023). Perforación de taladros largos.

2.1.5.4 Carguío y voladura. En esta tarea se realiza el carguío de explosivos y su posterior voladura, el cual la voladura primaria que se considera a la voladura de los taladros largos con longitudes de 12.5 metros aproximadamente. La voladura de chimeneas se realiza con el método de VCR se dispara por tramos de 3 a 5 metros esto sirve para realizar la cara libre y posteriormente se disparan las secciones de producción.

Figura 26

Carguío y voladura del tajeo.



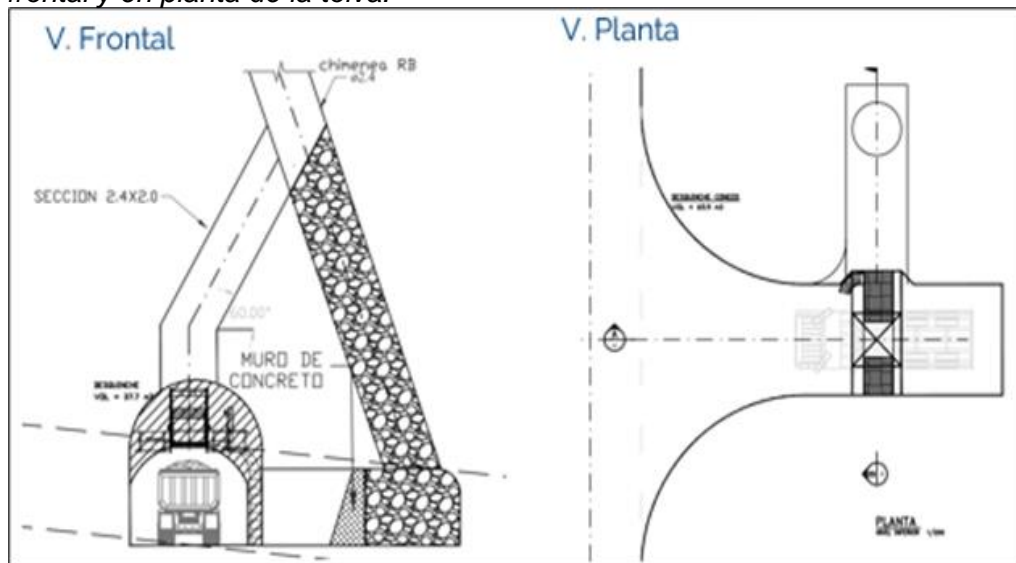
Fuente: Mina en estudio.

2.1.5.5 Limpieza de mineral. En esta tarea se realiza el acarreo mediante cámaras de carguío y tolvas. En esta tarea se realiza el acarreo mediante cámaras de carguío y tolvas.

2.1.5.5.1 Tolva. Se realiza mediante una chimenea RB, el cual continua mediante un brazo de sección 2.4 x 2.2.

Figura 27

Vista frontal y en planta de la tolva.



Fuente: Minsur (2023) Plan de minado.

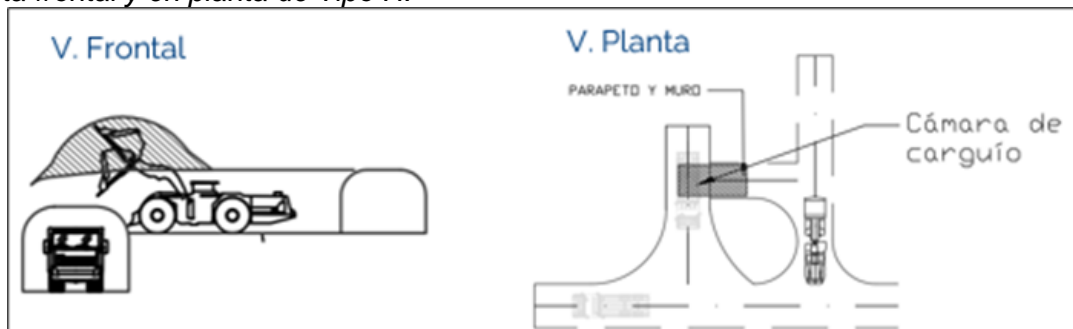
2.1.5.5.2 Cámara de carguío.

Tipo H:

El carguío se realiza con la ubicación del Scoop en el nivel superior para el respectivo carguío.

Figura 28

Vista frontal y en planta de Tipo H.



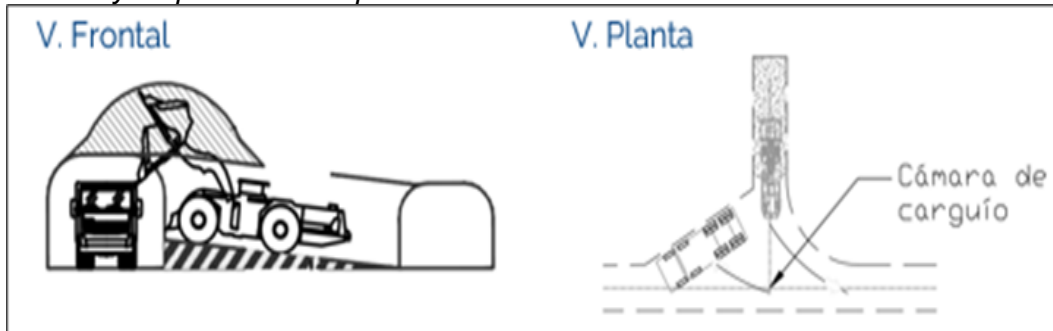
Fuente: Minsur (2023). Plan de minado.

Rampa de concreto:

Se realiza mediante la elaboración de una pequeña rampa de concreto y un realce.

Figura 29

Vista frontal y en planta de rampa de concreto.



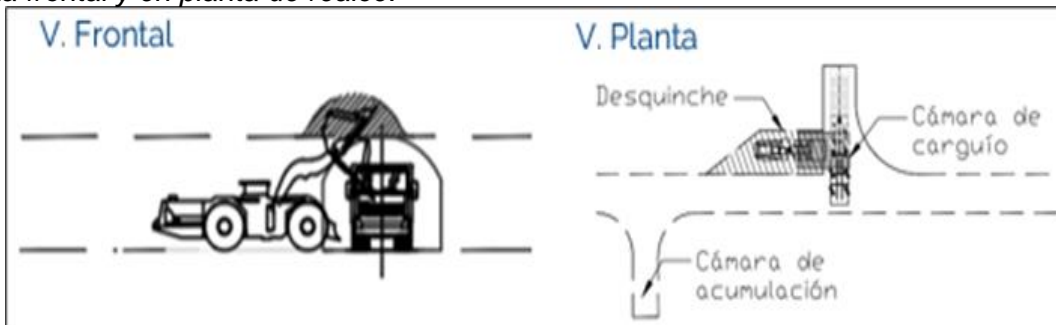
Fuente: Minsur (2023). Plan de minado.

Realce:

Se realiza mediante la elaboración de una pequeña rampa de concreto y un realce.

Figura 30

Vista frontal y en planta de realce.



Fuente: Minsur (2023). Plan de minado.

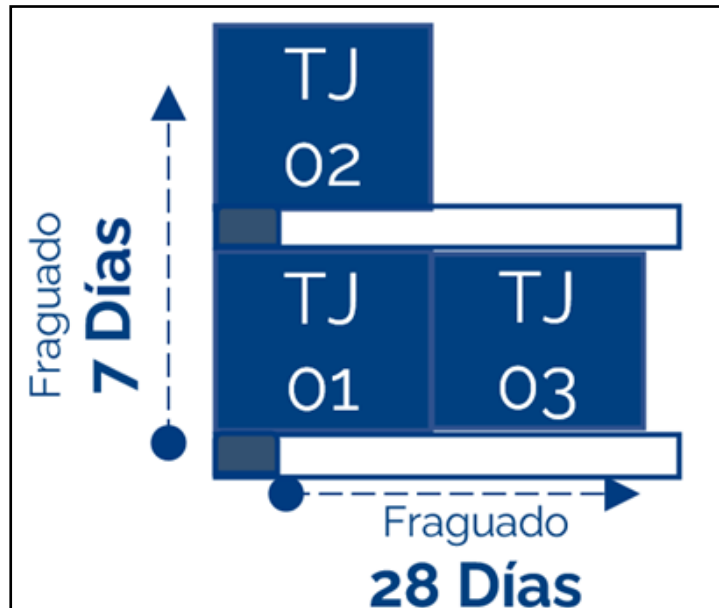
2.1.5.6 Relleno.

2.1.5.6.1 Relleno en pasta. El relleno es depositado a través de un sistema de tuberías que desciende desde la planta del relleno hacia los tajeos explotados con la finalidad de brindar la estabilidad global del tajeo y el control del máximo radio hidráulico. Así también, el uso de relleno en pasta es satisfactorio para el control y mitigación del estallido de rocas.

Se tiene los siguientes tiempos de fraguado; 7 días (minado vertical) y 28 días (minado horizontal).

Figura 31

Tiempos de fraguado.

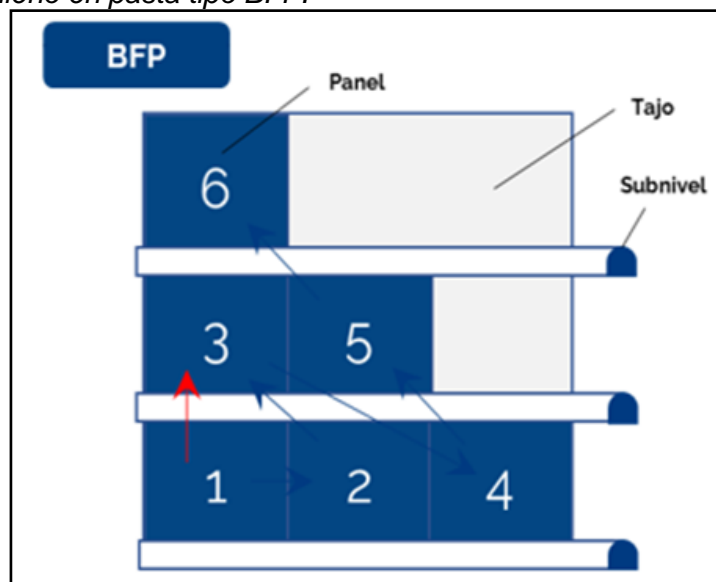


Fuente: Minsur (2023). Plan de minado.

Bench & Fill en pasta emplea una secuencia zigzag en donde se aprovecha el rápido fraguado vertical (7 días) para dinamizar la explotación de estructuras.

Figura 32

Secuencia de relleno en pasta tipo BFP.

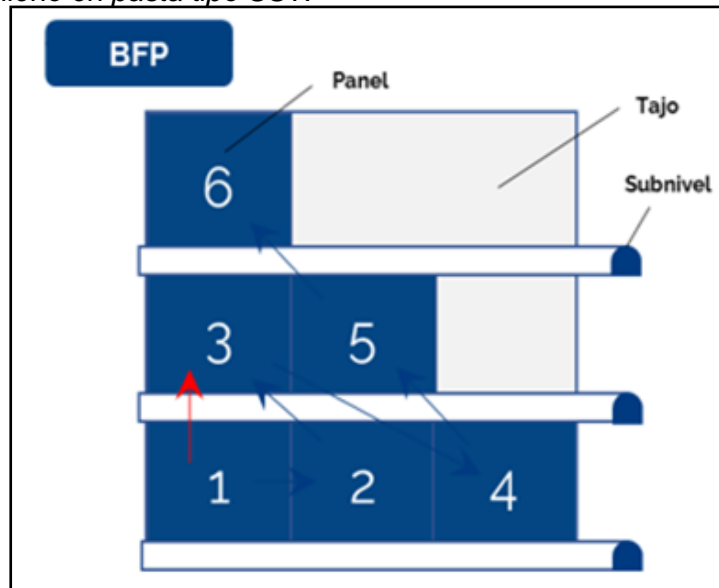


Fuente: Minsur (2023). Plan de minado.

El Sublevel Stopping Transversal permite la explotación de tres tajeos verticales en secuencia y el fraguado es de 12 días.

Figura 33

Secuencia de relleno en pasta tipo SST.

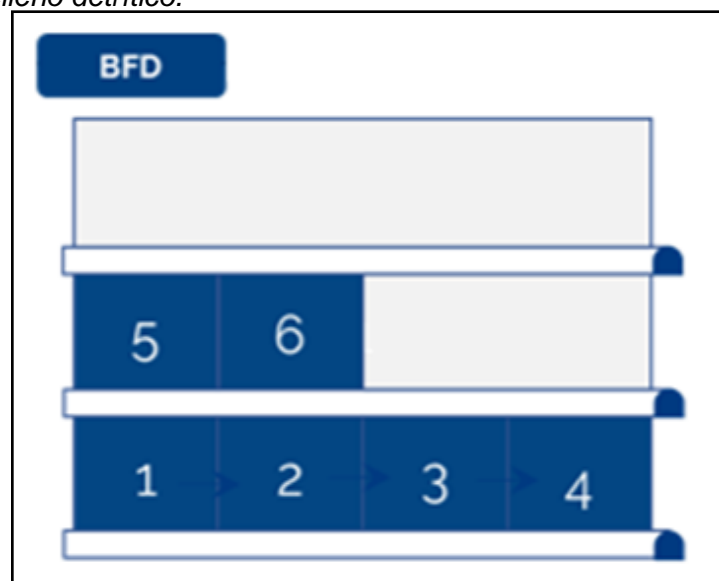


Fuente: Minsur (2023). Plan de minado.

2.1.5.6.2 Relleno Detrítico. El relleno es depositado de manera continua, empezando desde un extremo del subnivel de explotación. En la Unidad Minera es normalmente utilizado en casos de vetas angostas (< 3 m) y en vetas potentes (3 a 8 m) en donde la zona que usualmente presenta mayor riesgo de desprendimiento de bloques es la caja techo y en la bóveda del tajeo.

Figura 34

Secuencia de relleno detrítico.



Fuente: Minsur (2023). Plan de minado.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Productividad

Indicador de eficiencia operativa que evalúa el rendimiento temporal al relacionar los recursos utilizados con la cantidad de mineral extraído o avance logrado en el desarrollo de labores

2.2.2 Producción

Cantidad de mineral útil extraído desde labores subterráneas durante un periodo determinado, expresada generalmente en toneladas por día (tpd), por turno o por hora. Este valor se obtiene a partir de la relación entre el volumen de mineral removido y el tiempo efectivo de operación.

2.2.3 Eficiencia

Grado de aprovechamiento de los recursos disponibles (equipos, personal, tiempo) en función del resultado obtenido, comúnmente expresado como el porcentaje entre el tiempo productivo y el tiempo total disponible.

2.2.4 Disponibilidad

Porcentaje de tiempo en que un equipo está disponible para operar respecto al tiempo total calendarizado.

2.2.5 Utilización

Porcentaje de tiempo en que un equipo está efectivamente operando respecto a su tiempo disponible.

2.2.6 Simulación

Proceso de modelar y replicar en un entorno computacional las condiciones y operaciones de una mina subterránea para analizar y predecir el comportamiento de los sistemas mineros bajo diferentes escenarios.

2.2.7 Adherencia

Grado de cumplimiento o alineación de las actividades operativas con los planes y procedimientos establecidos.

2.2.8 Cumplimiento

Grado de ajuste entre la producción real y los objetivos establecidos para evaluar la efectividad de la planificación operativa y la eficiencia en la ejecución de las actividades.

2.2.9 Planificación

Proceso sistemático de definir metas y asignar los recursos necesarios para alcanzar los objetivos de producción dentro de los plazos establecidos.

2.2.10 Frente

Progresión de los trabajos de excavación y desarrollo en un frente minero específico, y se miden en metros por día (m/día) o metros por turno (m/turno).

2.2.11 Turno

Período de tiempo en el que un grupo de trabajadores realiza sus actividades operativas dentro de un ciclo determinado

2.2.12 Nivel

Se refiere a las diferentes elevaciones o profundidades en las que se desarrollan las actividades mineras dentro de la mina, los cuales son medidos en metros respecto a una cota de referencia, y su identificación es clave para la planificación y ejecución de las operaciones de extracción y desarrollo.

2.2.13 Suministro

Cantidad de recursos materiales, equipos y energía que se requieren para las operaciones mineras en un período específico.

2.2.14 Sección

Área transversal de una galería, túnel o laboreo subterráneo, definida por su ancho y alto, diseñada para permitir el acceso, ventilación, sostenimiento, y tránsito de equipos y personal.

2.2.15 Modelamiento

Proceso de construcción de representaciones de los cuerpos minerales, estructuras geológicas o procesos operativos, con el fin de predecir, optimizar y planificar con mayor precisión las actividades mineras.

2.2.16 Secuenciamiento

Proceso de planificación técnica que determina el orden lógico y temporal en que deben ejecutarse las labores mineras de desarrollo y explotación, con el objetivo de optimizar la recuperación del mineral, garantizar la estabilidad geomecánica y maximizar la eficiencia operativa.

2.2.17 Voladura

Proceso controlado mediante el cual se fragmenta la roca en una labor subterránea, utilizando explosivos alojados en barrenos previamente perforados, con el objetivo de habilitar avances en el desarrollo, extracción de mineral o preparación de labores.

2.2.18 Transporte

Operación unitaria encargada del traslado del material fragmentado (mineral o desmonte) desde el frente de explotación hasta puntos de acopio, tolvas intermedias o superficie.

2.2.19 Fraguado

Proceso fisicoquímico mediante el cual una mezcla cementicia utilizada en relleno o sostenimiento (como relleno cementado o shotcrete) endurece progresivamente, pasando de un estado plástico a uno sólido, desarrollando resistencia mecánica con el tiempo.

2.2.20 Tajeo

Volumen de material extraído desde un área específica del yacimiento, medido en unidades de volumen o toneladas. Este volumen depende de la geometría del yacimiento, la metodología de explotación utilizada y la eficiencia operativa en términos de tiempo y recursos empleados.

2.2.21 Barreno

Perforación lineal realizada en la roca mediante equipos de perforación, con el objetivo de alojar explosivos que permitirán fragmentar el macizo rocoso durante la operación de voladura.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

En la operación minera subterránea analizada, se observaron tiempos muertos relevantes durante las fases de ingreso, almuerzo y salida de mina, lo que limita la eficiencia operativa real a aproximadamente 4 a 5 horas efectivas por guardia. Asimismo, se registraron periodos de inoperatividad de los equipos Scooptram asociados al cambio de motores, afectando la continuidad de las labores. A pesar de que ciertos equipos presentan una alta disponibilidad mecánica, su baja utilización evidencia deficiencias en la programación de actividades y en la gestión de flota, representando un área crítica para la optimización de los procesos productivos. A continuación, se presenta el cronograma por guardia en la siguiente figura.

Figura 35

Cronograma por guardia.



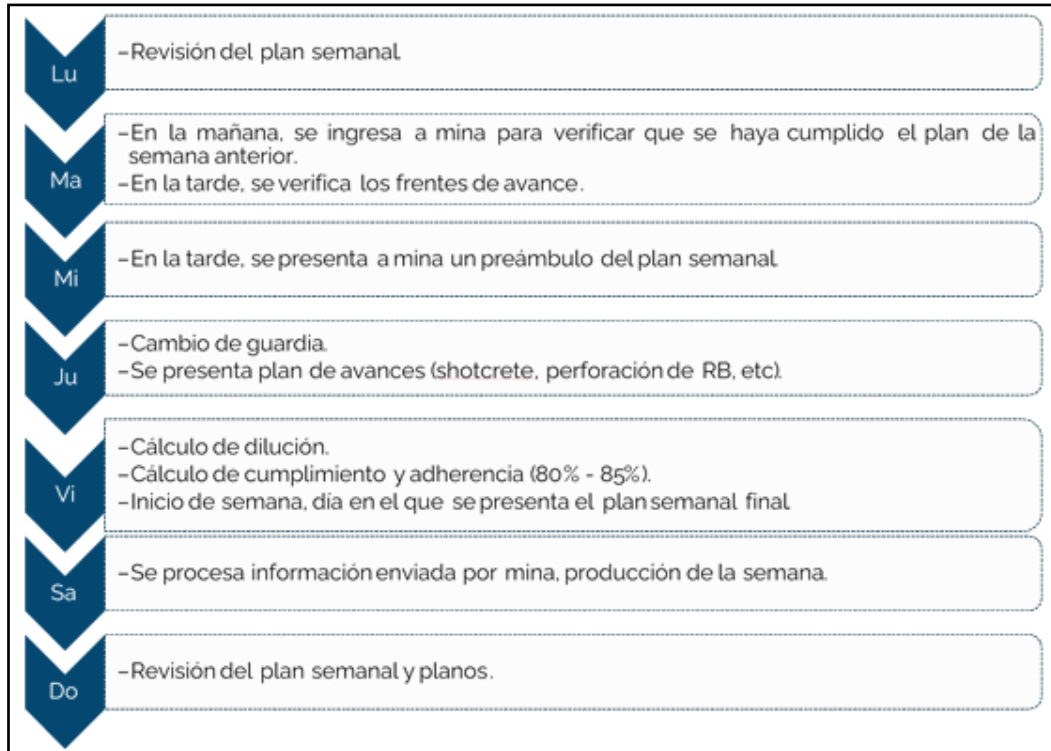
Fuente: Mina en estudio.

Además, se identificó una constante necesidad de revisión de los planes semanales de corto plazo debido a la falta de actualización de la realidad operativa en mina. Esta situación genera desalineamientos entre la programación y la ejecución, afectando la eficiencia de los procesos productivos. Además, se evidenció una confiabilidad del 70% en la reportabilidad de avances, lo que limita la precisión de los indicadores de gestión y

dificulta la toma de decisiones estratégicas basadas en datos confiables. La siguiente figura muestra las actividades semanales por parte del área conjunta de operaciones.

Figura 36

Actividades de la semana.



Fuente: Mina en estudio.

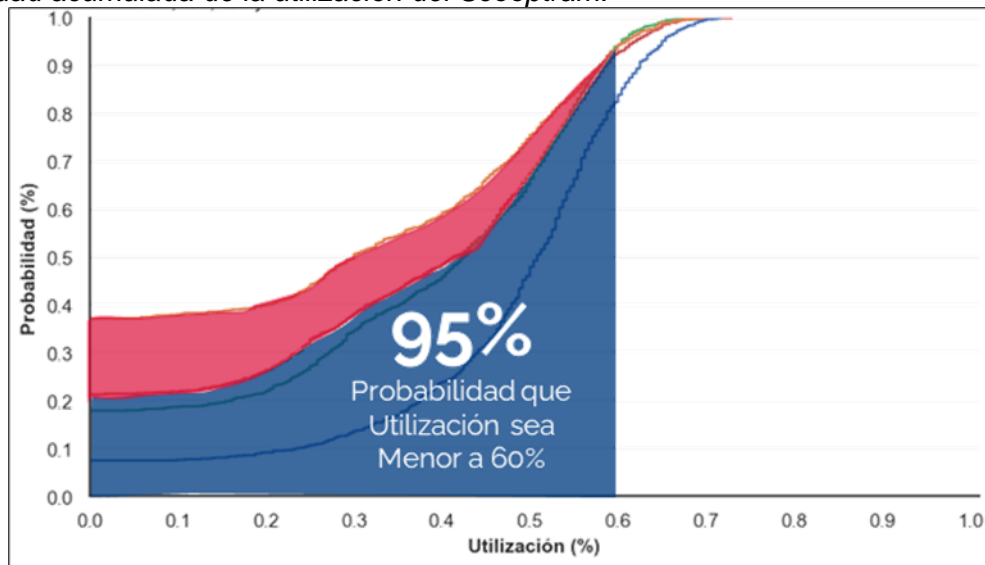
Con respecto a la evaluación de la infraestructura subterránea, se determinó que no existe un control formal de tráfico en la rampa principal, lo que, si bien permite un acceso expedito, podría representar riesgos operativos en condiciones de alta circulación. La rampa presenta un ancho adecuado y un buen estado de conservación, lo que facilita el tránsito seguro de equipos.

3.1.1 Indicadores de los equipos mecanizados

3.1.1.1 Equipos de acarreo. A partir del análisis de los registros operativos de los equipos Scooptram, se observa que mantienen disponibilidades superiores al 80%. No obstante, las tasas de utilización efectiva evidencian considerables pérdidas asociadas a demoras operativas, situándose en un rango aproximado del 30% al 40%. A continuación, se presentan la utilización y productividad respectivamente de los equipos Scooptram.

Figura 37

Densidad acumulada de la utilización del Scooptram.

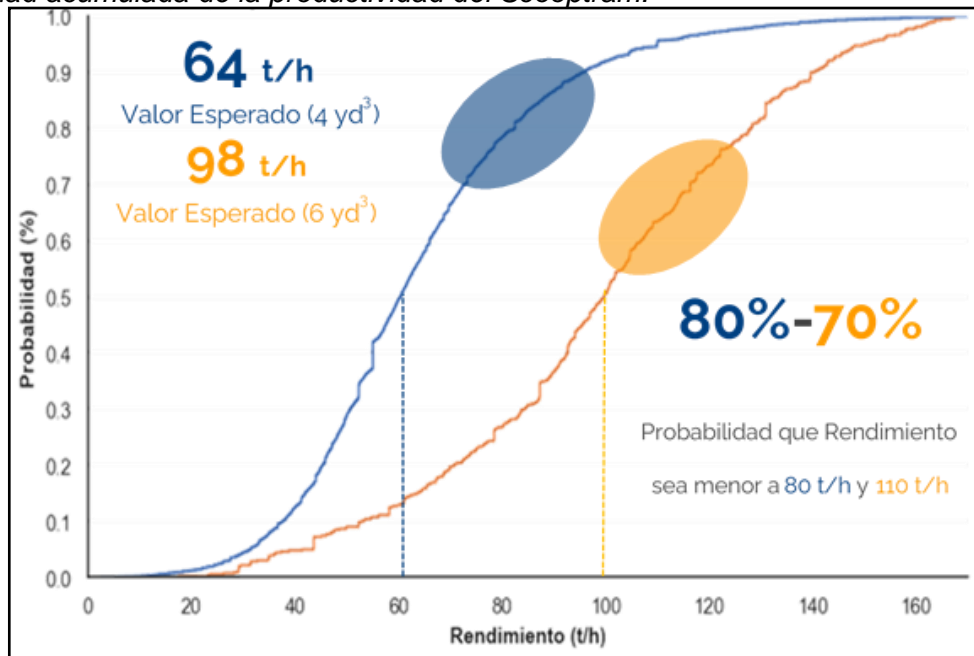


Fuente: Mina en estudio.

En la figura 37 se evidencia que la disponibilidad tiene una alta probabilidad de superar el 80%, sin embargo, la utilización tiene un 5% de probabilidad de superar el 60%.

Figura 38

Densidad acumulada de la productividad del Scooptram.

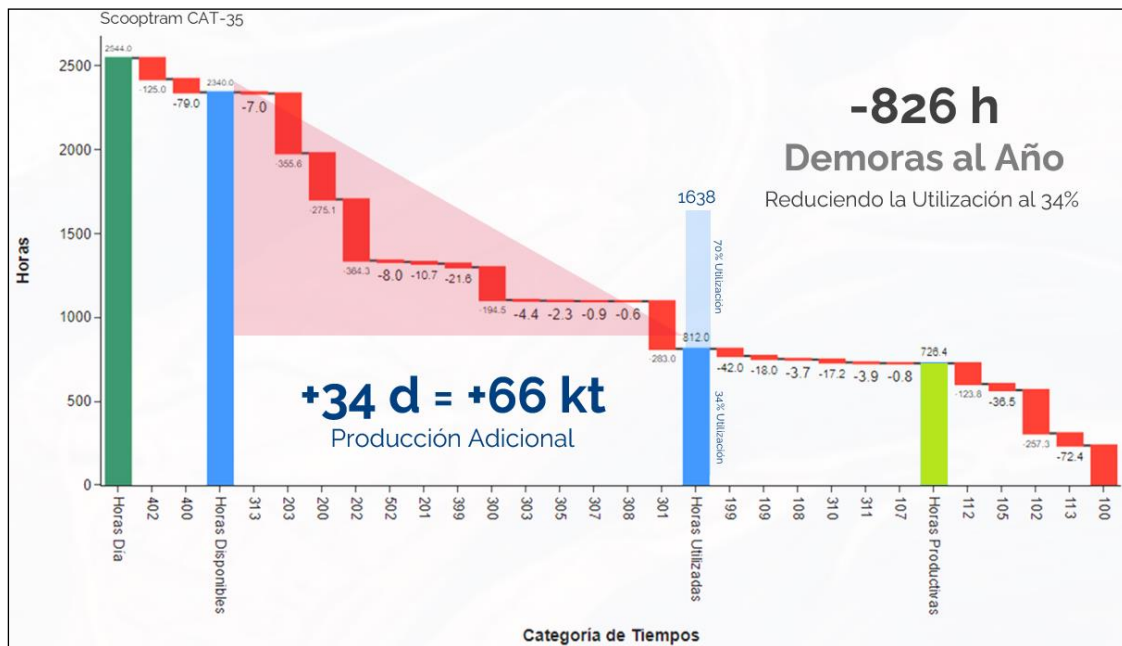


Fuente: Mina en estudio.

En la figura 38 se evidencia que el rendimiento observado en ambos tipos de equipos está por debajo del valor esperado teórico (64 t/h y 98 t/h), indicando desviaciones operativas o ineficiencias en la carga, acarreo o descarga del mineral.

Figura 39

Análisis de ventana horaria del Scooptram.



Fuente: Mina en estudio.

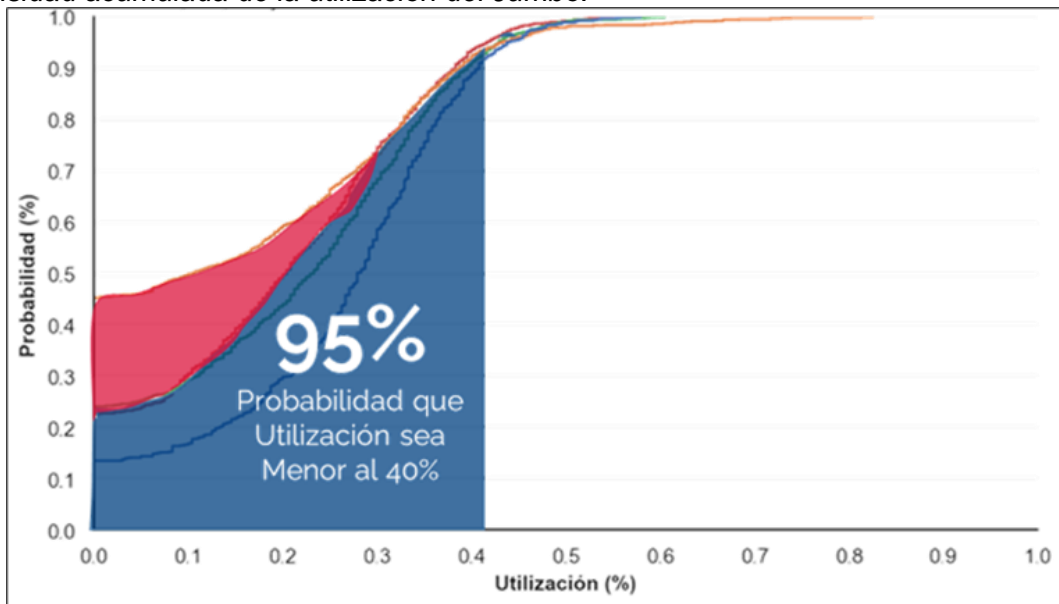
En la figura 39 se presenta el análisis del rendimiento operativo anual del Scooptram CAT-35, considerando un total de 2544 horas calendario. Tras descontar mantenimientos programados y tiempos de engrase, se obtienen 2340 horas disponibles para operación. No obstante, debido a diversas categorías de demoras operativas, el equipo solo logra utilizar 812 horas, lo que representa una utilización efectiva del 34%.

Las demoras acumuladas a lo largo del año suman 826 horas, afectando directamente la productividad del equipo. Se estima que, al mejorar la gestión del tiempo y reducir las ineficiencias hasta alcanzar una utilización del 70%, se podrían recuperar 1638 horas de operación, lo que permitiría añadir 34 días de trabajo efectivos y obtener una producción adicional de aproximadamente 66 mil toneladas.

3.1.1.2 Equipos de perforación. A partir del análisis de los registros operativos de los equipos Jumbos, se observa que mantienen disponibilidades superiores al 85%. No obstante, las tasas de utilización efectiva evidencian considerables pérdidas asociadas a demoras operativas, situándose en un rango aproximado del 25% al 30%. A continuación, se presentan la utilización y productividad respectivamente de los equipos Jumbos.

Figura 40

Densidad acumulada de la utilización del Jumbo.

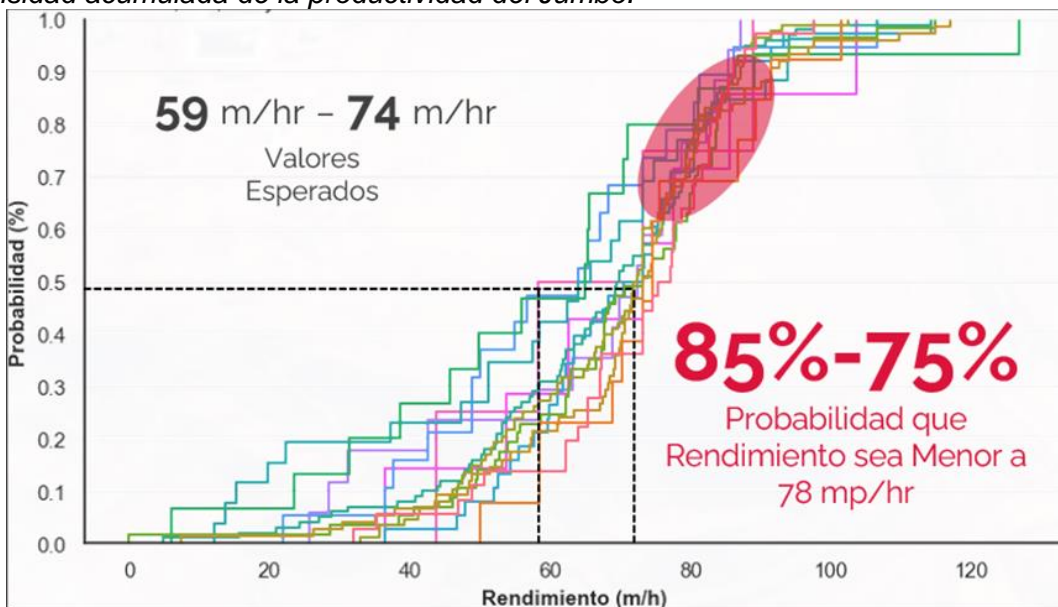


Fuente: Mina en estudio.

En la figura 40 se evidencia que la disponibilidad tiene una alta probabilidad de superar el 85%, sin embargo, la utilización tiene un 5% de probabilidad de superar el 40%.

Figura 41

Densidad acumulada de la productividad del Jumbo.



Fuente: Mina en estudio.

En la figura 41 se evidencian los valores esperados de avance se sitúan en un rango de 59 a 74 metros por hora. El análisis muestra que existe entre un 75% y 85% de probabilidad de que el rendimiento real sea inferior a 78 metros perforados por hora.

Figura 42

Análisis de ventana horaria del Jumbo.



Fuente: Mina en estudio.

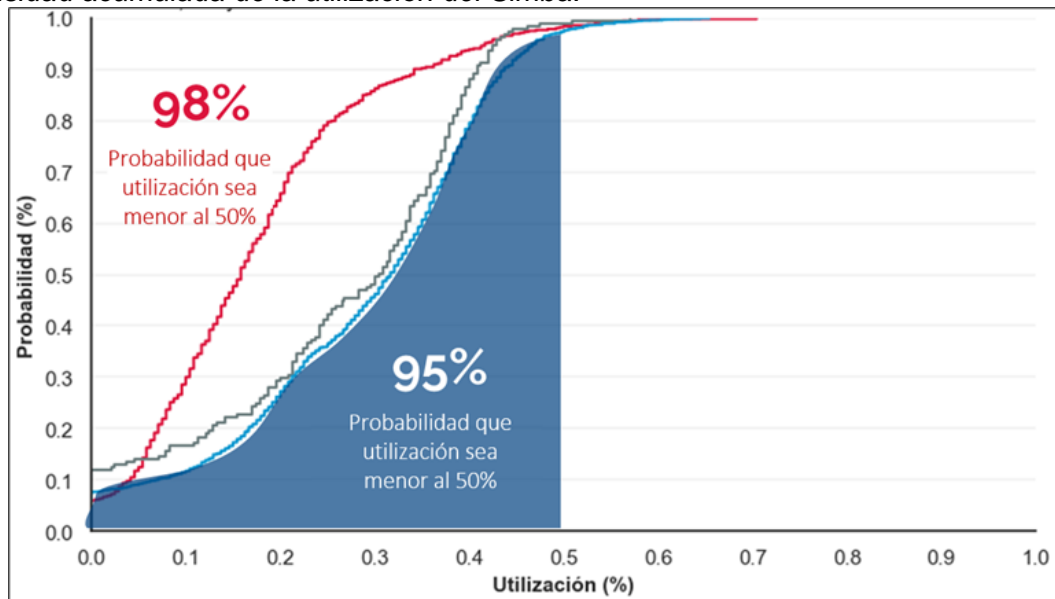
En la figura 42 se presenta un análisis detallado de la utilización horaria del equipo Jumbo JS-28 durante un periodo anual, considerando un total de 3840 horas calendario. Tras descontar mantenimientos programados y tiempos de engrase, se obtienen 3778.5 horas disponibles. Sin embargo, la ocurrencia de ineficiencias operacionales reduce las horas efectivas operadas a 914.4 horas, representando una utilización real de apenas 24%.

La suma de las demoras operativas acumuladas alcanza 1731 horas anuales, evidenciando una pérdida significativa de tiempo productivo. Si estas demoras fueran mitigadas y se lograra una utilización del 70%, el equipo podría operar hasta 2.645 horas anuales, lo que permitiría incorporar 72 días adicionales de trabajo, con un potencial estimado de incremento de producción de 136 kilómetros perforados.

3.1.1.2 Equipos de taladros largos. A partir del análisis de los registros operativos de los equipos Simbas, se observa que mantienen disponibilidades superiores al 80%. No obstante, las tasas de utilización efectiva evidencian considerables pérdidas asociadas a demoras operativas, situándose en un rango aproximado del 50%. Se detallan a continuación los índices de utilización y productividad de los equipos Simbas.

Figura 43

Densidad acumulada de la utilización del Simba.

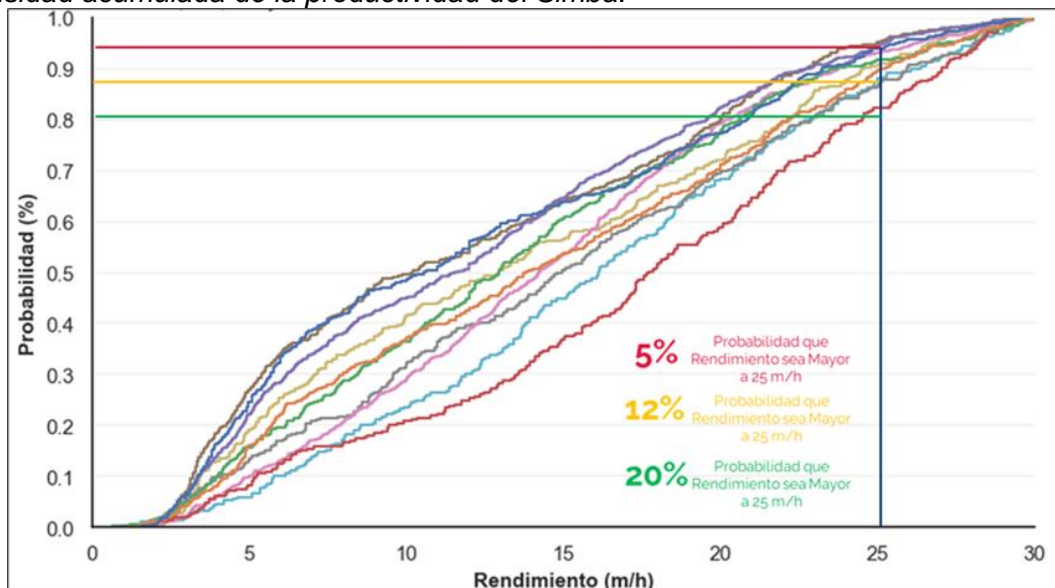


Fuente: Mina en estudio.

En la figura 43 se evidencia la disponibilidad tiene una alta probabilidad de superar el 80%, sin embargo, la utilización tiene un 5% de probabilidad de superar el 50%.

Figura 44

Densidad acumulada de la productividad del Simba.

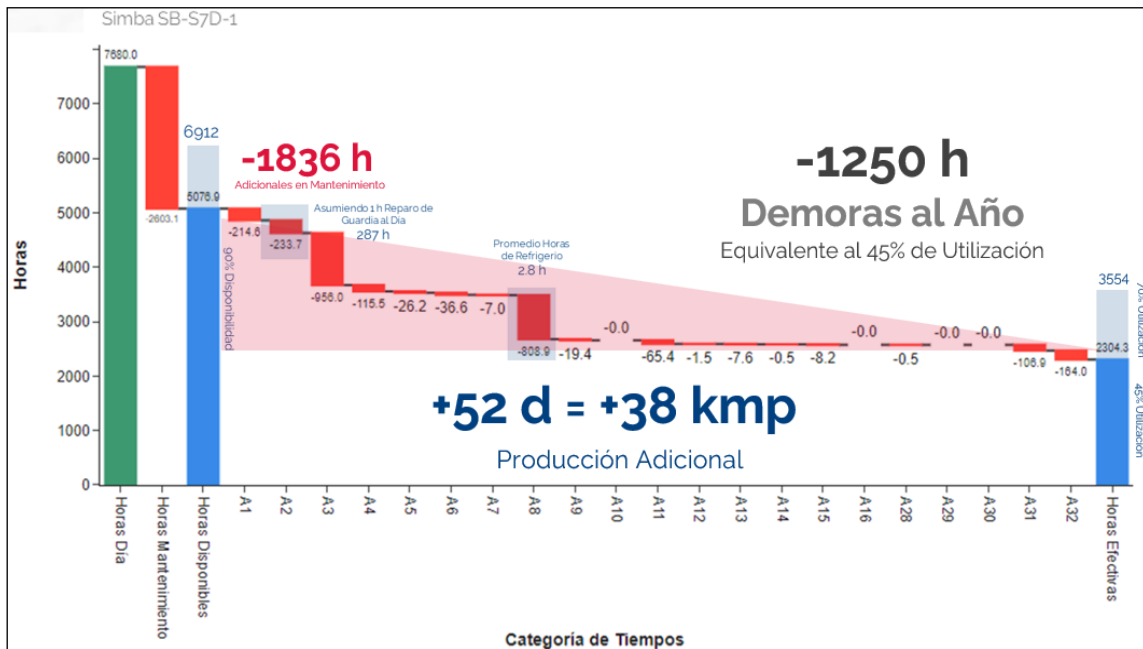


Fuente: Mina en estudio.

En la figura 44 se observa que la probabilidad de superar un rendimiento de 25 m/h es baja: 5% en setiembre, 12% en octubre y 20% en noviembre, evidencia una baja eficiencia y alta dispersión en el desempeño.

Figura 45

Análisis de ventana horaria del Simba.



Fuente: Mina en estudio.

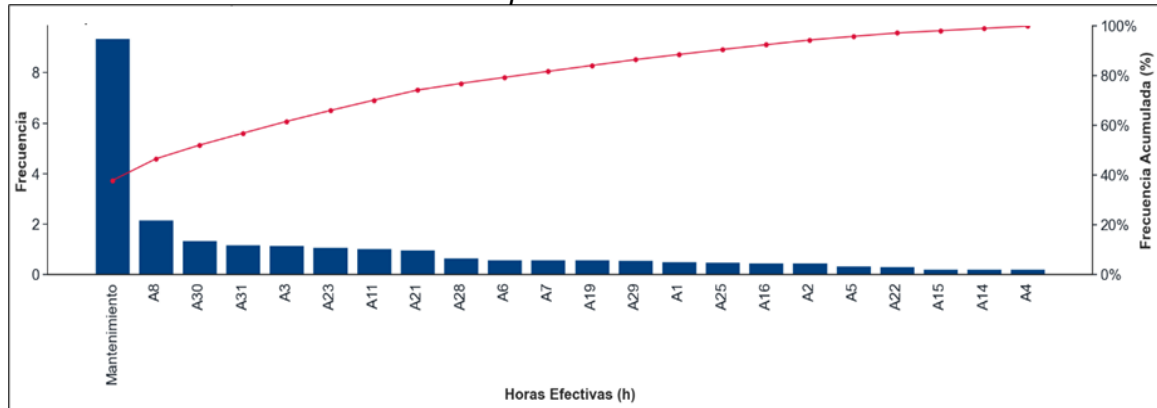
La figura 45 presenta un análisis detallado del uso anual de horas para el equipo Simba S7D-1, considerando un total de 7680 horas anuales disponibles, se identifican 2603 horas en mantenimiento, quedando 5078 horas técnicamente disponibles para operación tras descontar tiempos de mantenimiento programado y no programado. A partir de este total de horas disponibles, se observa una serie de pérdidas operativas (asociadas a fallas, tiempos de refrigerio, preparación, logística, entre otros) que reducen la utilización operacional efectiva al 45%. En contraste, un escenario de referencia con 70% de utilización permitiría alcanzar 3554 horas efectivas, lo cual representa una brecha de 1250 horas/año.

Adicionalmente, el gráfico evidencia un exceso de 1836 horas en mantenimiento, lo cual representa una oportunidad crítica de mejora. Esta pérdida acumulada, junto con las demoras operacionales, implica una pérdida de capacidad productiva equivalente a 52 días lo cual es equivalente a 38 kilómetros de perforación por año. La baja utilización observada indica una subutilización significativa del principalmente por factores de gestión de mantenimiento, coordinación operativa y eficiencia en la jornada.

3.1.2 Identificación de principales desviadores

Figura 46

Análisis de Pareto de desvíos del Scooptram.

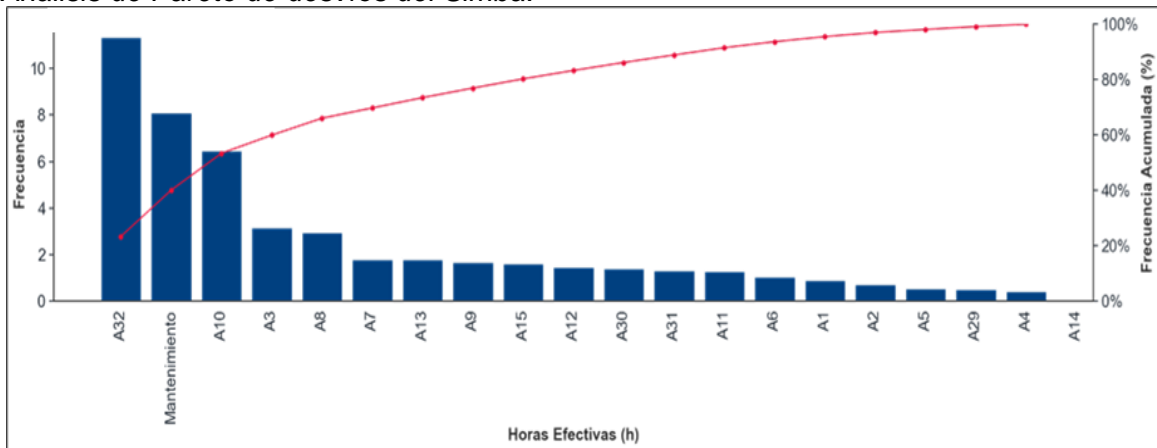


Fuente: Mina en estudio.

La figura 46 fundamenta cuantitativamente la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo para reducir la dependencia del mantenimiento correctivo. Asimismo, el análisis permite priorizar planes de mejora hacia las causas más críticas, maximizando así el retorno de inversión en eficiencia operativa.

Figura 47

Análisis de Pareto de desvíos del Simba.



Fuente: Mina en estudio.

La figura 47 presenta un análisis que permite justificar técnicamente la necesidad de mejorar la coordinación operativa y logística en el inicio de turnos, así como de mejorar la planificación y ejecución del mantenimiento. Este equipo representa un cuello de botella en la cadena de producción (avance de labores y preparación de malla de perforación), estas pérdidas impactan directamente en la tasa de avance y el cumplimiento mensual.

Figura 48

Análisis de eficiencia global de equipos.



Fuente: Mina en estudio.

La figura 48 permite ilustrar cuantitativamente las ineficiencias en la gestión de equipos críticos, proporcionando una base sólida para proponer mejoras operacionales o tecnológicas. Puede usarse como eje central de capítulos sobre gestión de activos, análisis de desempeño de equipos, además de alimentar modelos de simulación o benchmarking entre minas.

El OEE final de 69% indica que solo 69 de cada 100 horas del tiempo calendario se traducen en producción efectiva y conforme, lo cual es un valor razonable en contextos mineros subterráneos, aunque hay oportunidades claras de mejora en disponibilidad operacional y eficiencia de ciclos.

Este enfoque es fundamental para evaluar el rendimiento operativo de equipos clave como Jumbos, Simbas o Scooptrams en minería subterránea, y se basa en tres componentes clave: disponibilidad, rendimiento y calidad. Los cuales se disgregan en los siguientes análisis por bloques:

Tiempo disponible (87%)

- Se pierden 13 puntos porcentuales por mantenimiento correctivo y planificado, lo que es esperable, pero requiere una adecuada programación y ejecución para no afectar la operación.
- Este valor indica una alta disponibilidad mecánica, esencial para equipos en ciclos continuos como los Scooptrams o equipos de perforación.

Uso de la disponibilidad (77%)

- Se pierden 10 puntos porcentuales por paradas operativas (8%) y no operativas (2%), asociadas a factores externos como logística, espera de órdenes, traslado de cuadrilla o congestión de labores.
- La pérdida por paradas operativas sugiere deficiencias en la gestión operativa y coordinación inter-áreas, como operaciones, mantenimiento y seguridad.

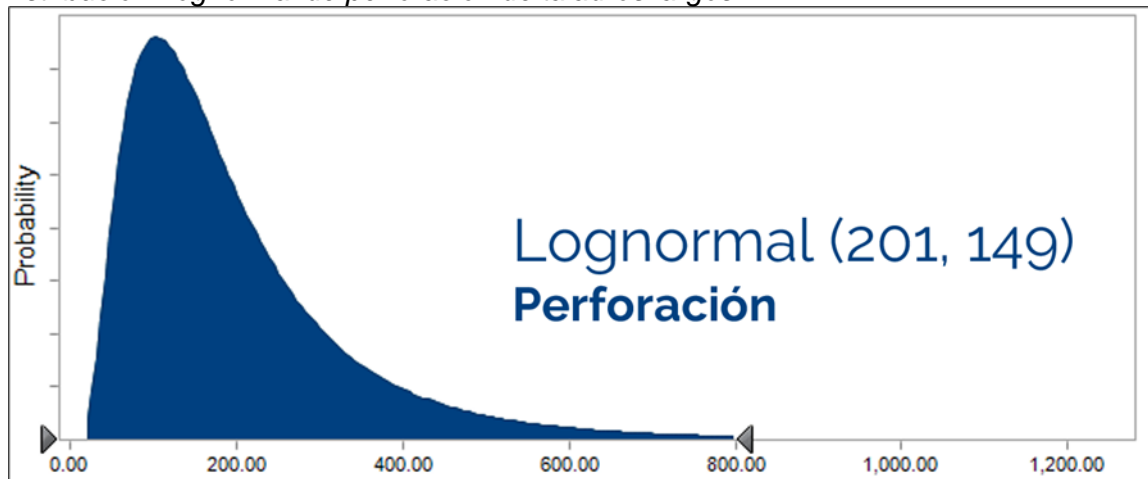
Eficiencia de rendimiento y calidad (69%)

- Se identifican pérdidas por variación de velocidad (4%), el cual está relacionado con la disminución de ciclos por hora debido a condiciones operativas desfavorables (dureza del macizo rocoso, ventilación, etc.).
- Se identifican pérdidas de calidad (4%), el cual representan material no conforme, perforación fuera de tolerancia o fallas en el ciclo de producción que afectan el cumplimiento de estándares técnicos.

3.1.3 Análisis del cuello de botella

Figura 49

Distribución Lognormal de perforación de taladros largos.



Fuente: Mina en estudio.

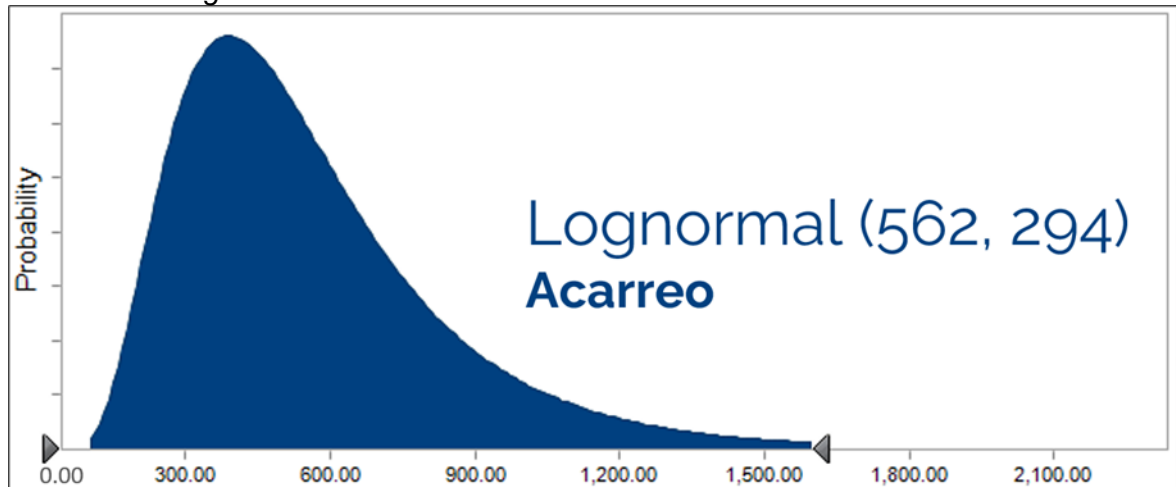
La figura 49 muestra la distribución estadística del tiempo de perforación registrado por un equipo Simba S7D, modelado mediante una distribución lognormal con parámetros (201, 149).

El valor modal (más frecuente) se encuentra cercano en el rango de 100 a 200 minutos, lo que indica que la mayoría de los ciclos de perforación se concentran en ese rango.

No obstante, la presencia de una cola larga hacia la derecha evidencia que existen ocasiones en que el proceso de perforación se extiende mucho más allá de lo esperado, alcanzando desde los 600 a 800 minutos o más.

Figura 50

Distribución Lognormal del acarreo.



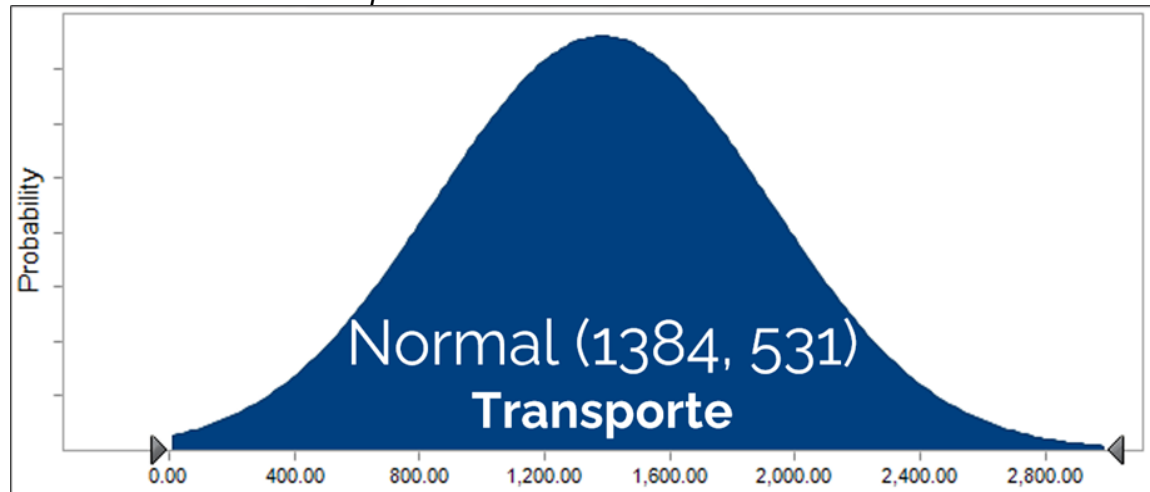
Fuente: Mina en estudio.

La figura 50 muestra la distribución de probabilidad de los tiempos asociados al ciclo operativo de un equipo de acarreo tipo Scooptram LHD, modelada mediante una distribución lognormal con parámetros (562, 294). Este tipo de distribución es adecuada para representar datos de duración positivos y asimétricos, como los observados en procesos logísticos de acarreo subterráneo.

El valor más frecuente de la distribución se encuentra cercano a los 450 minutos, lo cual sugiere que, en condiciones operativas normales, ese es el tiempo típico que el equipo requiere para completar su ciclo. No obstante, la cola derecha extendida indica que existe una proporción significativa de eventos donde los tiempos de acarreo se alargan considerablemente, alcanzando valores cercanos a 1700 minutos. Esta dispersión refleja una alta variabilidad operativa.

Figura 51

Distribución normal del transporte.



Fuente: Mina en estudio.

La figura 51 presenta la distribución de probabilidad de los tiempos operativos para un volquete Volvo en tareas de transporte de material, ajustada mediante una distribución normal con media 1384 minutos y desviación estándar de 531 minutos. Esta distribución simétrica es indicativa de una operación relativamente estable en comparación con los procesos de perforación o acarreo, que tienden a mostrar comportamientos lognormales debido a su naturaleza cíclica y a los retrasos acumulativos.

La media de 1384 minutos representa el tiempo promedio en que el equipo realiza su labor de transporte durante el periodo analizado, mientras que la desviación estándar refleja una variabilidad significativa, aunque simétrica, alrededor de este valor. La forma de campana sugiere que los tiempos de transporte están distribuidos de manera más equilibrada y que los valores extremos (muy bajos o altos) son menos frecuentes.

Este patrón puede deberse a que el transporte con volquetes presenta una menor exposición a interrupciones esporádicas, dado que estos equipos operan generalmente bajo rutas y distancias definidas, y su actividad depende más de la logística de despacho que de condiciones técnicas del frente de trabajo.

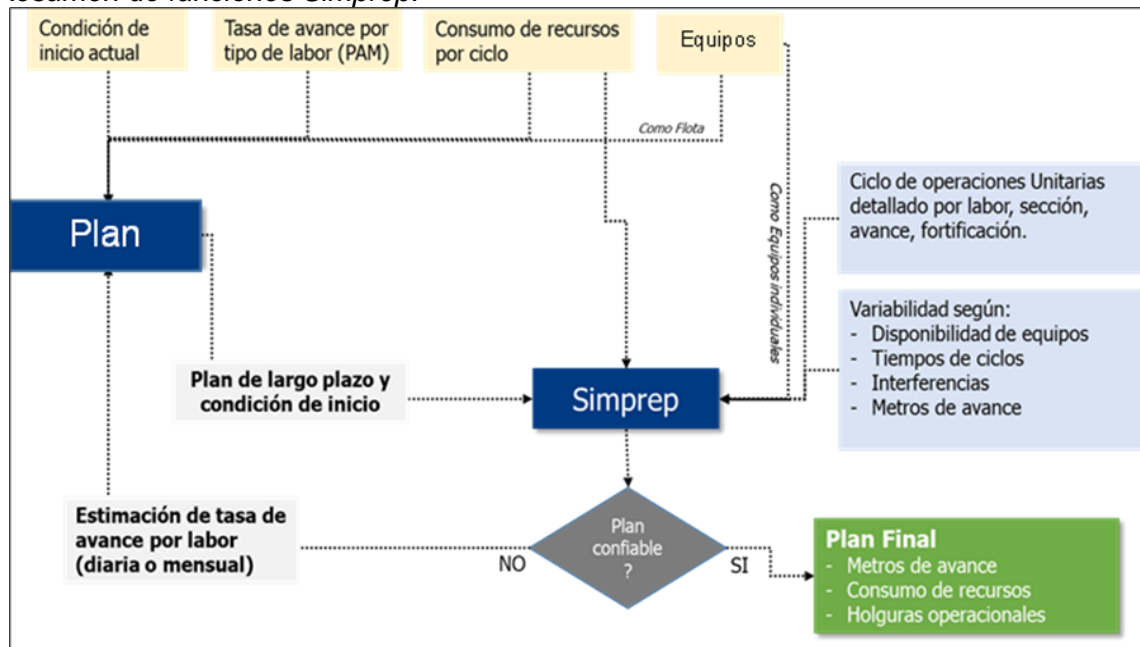
3.2 Procesamiento de la información

La implementación del simulador Simprep constituyó una herramienta fundamental para el fortalecimiento del proceso de mejora continua en las operaciones unitarias

mineras. Este software permite la generación de bases de datos a partir de la simulación de diversos escenarios operativos, facilitando el análisis de la confiabilidad mediante indicadores como la disponibilidad y la utilización de equipos. Posteriormente, la información obtenida es integrada en la plataforma Power BI, donde se desarrollan dashboards que permiten la visualización y evaluación de los KPIs, tanto a nivel general del plan simulado como a nivel desagregado, según el equipo, tipo de labor, sección operativa, entre otros criterios. A continuación, se detalla mediante la siguiente figura las funciones del Simprep.

Figura 52

Resumen de funciones Simprep.



Fuente: Mohana V. (2023) Reporte técnico Simprep.

En la figura 52 presenta un esquema detallado que describe la interacción entre los distintos inputs requeridos por el simulador Simprep, los cuales actúan de manera integrada para evaluar la confiabilidad de un plan de producción. En dicha representación se evidencia cómo los datos provenientes de la planificación y de la producción real se combinan con las condiciones operativas iniciales, permitiendo efectuar análisis comparativos entre el plan proyectado y el desempeño real de la operación minera.

Asimismo, la figura ilustra cómo se incorporan los datos relacionados con las capacidades y limitaciones de los equipos, así como las restricciones propias del proceso

productivo, en la evaluación de la confiabilidad del plan de producción. En conjunto, esta representación gráfica proporciona una visión integral del flujo de información entre los distintos inputs, permitiendo a los usuarios identificar si el plan simulado es técnicamente viable o requiere ajustes para su alineación con las condiciones reales de operación.

Esta capacidad de integración y análisis de múltiples variables operativas posiciona a Simprep como una herramienta estratégica ya que permite anticipar cuellos de botella, evaluar escenarios alternativos y maximizar los recursos disponibles. Al simular diferentes configuraciones bajo condiciones controladas, es posible validar supuestos técnicos del plan minero y tomar decisiones fundamentadas en función de la variabilidad operativa.

La mejora de las operaciones unitarias en minería subterránea depende en gran medida de una planificación operativa eficaz que permita gestionar de forma adecuada los recursos disponibles y minimizar los tiempos improductivos. En este contexto, los planes operativos diarios representan una herramienta estratégica clave, ya que permiten visualizar en detalle tanto el estado operativo de los equipos como la secuencia y duración de las labores programadas en cada frente de trabajo. El uso del simulador Simprep facilita la construcción de estos planes a partir de la simulación de escenarios reales, generando bases de datos que permiten analizar la disponibilidad, utilización y eficiencia de los equipos, así como la sincronización de las actividades críticas del ciclo de minado.

3.3 Reportabilidad mediante evaluación de riesgos críticos

La evaluación de riesgos semanal está estructurada en columnas que representan tanto variables técnicas como parámetros operativos críticos para la planificación subterránea, se muestra en la siguiente figura la matriz de riesgos críticos.

Figura 53

Matriz de riesgos críticos

CUERPO/ VETA	AZONE	TAJO	PANEL	BANCO	TM	%Sn	Finos	Status Tajos	Prioridad	Nivel Riesgo	%Riesgo	Geomecánico (25%). Condición de Inestabilidad	Preparaciones In situ (15%).	Preparación para relleno del Tajo (5%).	Preparaciones en Relleno (5%)	Infraestructura (15%).	Relleno (15%).	Rehabilitaciones (10%).	Ventilación (10%).
CUERPO	CYN_P	TJ 4050-1800	P-07	4065-4050	4,554	1.92	87	En perforación	P1	Medio(2)	33%	Medio (2)	- NV 4050: Refugio de telemando -> 100% - NV 4065: Estocada By Pass (ID=25978)	✓	✓	✓	✓	* Nv. 4065: Rehabilitación (Post-minado)	✓
VETA	CYN_PV	TJ 3950-1600	P-03	4000-3980	3,507	4.95	174	En perforación	P1	Medio(2)	33%	Medio (2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CUERPO	VVL_CP3	TJ 3700-2400	P-07	3750-3734	6,005	0.87	52	En explotación	P2	Medio(2)	41%	Alto (1)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CUERPO	ROS	TJ 4254-650	P-03	4283-4302	3,023	1.87	57	Preparado	P2	Medio(2)	33%	Medio (2)	Nv. 4283 Refugio de telemando (ID=27124)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CUERPO	DL_SR3	TJ 4050-2100	P-08	4050-4030	3,929	1.35	53	En explotación	P2	Medio(2)	33%	Medio (2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CUERPO	SR_342	TJ 4539-2100	P-02	4621-4606	2,733	0.51	14	Perforado	P3	Medio(2)	43%	Alto (1)	✓	✓	✓	✓	TJ 4539-2100 P03 4621-4606 SR_342	✓	✓
VETA	VKIM	TJ 4269-1400	P-07	4310-4298	659	1.43	9	En perforación	P3	Medio(2)	33%	Medio (2)	Nv. 4298 Refugio de telemando (ID=26979)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VETA	CYN_PV	TJ 3950-1450	P-06	3967-3950	1,923	5.22	100	Por preparar	P1	Medio(2)	33%	Medio (2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VETA	CYN_PV	TJ 3950-1450	P-04	3980-3967	1,244	7.68	95	Preparado	P1	Medio(2)	33%	Medio (2)	Nv. 3967 Refugio de telemando (ID=25859)	✓	- NV 3980: Avance en relleno (ID=27115)	✓	✓	✓	✓
CUERPO	CYN_P	TJ 4000-1800	P-08	4017-4000	4,794	3.52	169	Preparado	P1	Medio(2)	33%	Medio (2)	Nv. 4000 Coneo (ID = 26184) / Nv. 4000 Estocada cara libre (ID = 26255)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VETA	JUDI	TJ 4065-1900	P-04	4075-4070	1,862	1.49	28	En perforación	P3	Medio(2)	39%	Medio (2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VETA	VELI	TJ 4000-1800	P-05	4030-4017	1,372	2.13	29	Preparado	P3	Medio(2)	33%	Medio (2)	Nv. 4017 Refugio de telemando (ID=25010)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Mina en estudio

Los campos; Azone, Tajo, Panel y Banco permiten ubicar espacialmente cada unidad operativa. El tajo representa la unidad mínima de explotación, mientras que el panel y el banco refieren a subdivisiones horizontales y verticales, respectivamente, que ayudan a ordenar las actividades de minado por zonas y niveles. Esta organización es esencial para el modelo Simprep, ya que permite estructurar la simulación según rutas operativas reales, conectividades y accesibilidad geológica.

Los campos TM (toneladas mineralizadas), %Sn (ley de estaño) y Finos permiten estimar el valor económico de cada tajo. El cálculo de finos (producto de TM x %Sn) es fundamental para la priorización operativa, dado que indica el contenido metálico recuperable. Estos datos se integran en el modelo para establecer los escenarios más rentables de explotación.

El campo Status Tajo, indica el estado actual de cada unidad (en perforación, preparado, en explotación, por preparar). Este parámetro permite definir el punto de partida dentro del flujo operativo en Simprep. Por ejemplo, si un tajo está en estado “en perforación”, el simulador iniciará la secuencia operativa desde esa actividad, considerando los tiempos y restricciones asociados.

La prioridad (P1, P2, P3) refleja la urgencia operativa definida por planificación y producción, siendo P1 la más crítica. A su vez, el nivel de riesgo y el porcentaje de riesgo (%) son indicadores derivados de evaluaciones geomecánicas y operativas. Este último porcentaje pondera los niveles de exposición a inestabilidad, accesos comprometidos o sostenimiento insuficiente. En el simulador, estos riesgos se traducen en penalidades de tiempo o exclusión de ciertos tajos del escenario base.

La columna Condición Geomecánica e Inestabilidad, complementa el análisis de riesgo, permitiendo identificar zonas donde se requiere reforzar el sostenimiento, aplicar mallas, pernos o modificar la secuencia de minado. Tajos con condición “alta” pueden implicar retrasos o incremento de costos si no se abordan adecuadamente.

A partir de este diagnóstico, se evalúa el estado de preparación de cada tajo mediante siete componentes: Preparaciones in situ (25%), Preparación para relleno del

tajo (15%), Preparaciones en relleno (5%), Infraestructura (15%), Relleno (15%), Rehabilitaciones (10%) y Ventilación (10%). Estos porcentajes representan el peso de cada actividad en el avance global de la preparación del tajo. Cuando todas estas actividades están completas, el tajo se considera 100% preparado y, por tanto, plenamente disponible para ser programado en el modelo Simprep.

El modelo utiliza estos porcentajes como premisas para establecer qué frentes son viables de explotar en un escenario determinado. Por ejemplo, un tajo con 85% de preparación, pero sin ventilación ni relleno será simulado con restricciones operativas y menor confiabilidad. Esto permite que el plan generado por SIMPREP no solo sea optimizado desde el punto de vista técnico, sino también ajustado a la realidad operativa semanal del yacimiento.

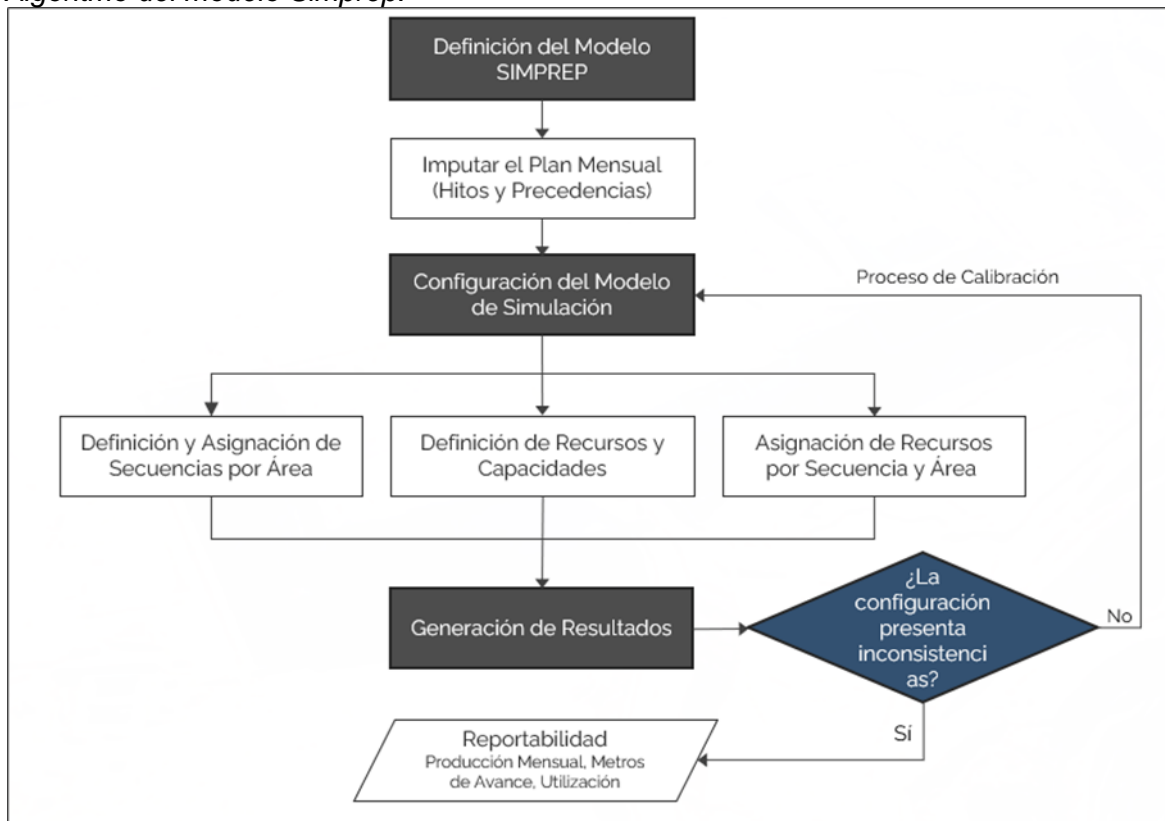
3.4 Algoritmo del software Simprep

El algoritmo del software SIMPREP se organiza en etapas que permiten simular y validar de manera precisa las operaciones unitarias en minería subterránea. El proceso inicia con la definición del modelo, donde se integran parámetros geológicos, geomecánicos y operativos. Luego, en la configuración operativa, se incorporan datos actualizados del campo, como el estado de los tajos, infraestructura disponible y evaluación semanal de riesgos, lo que permite establecer condiciones iniciales realistas para la simulación.

Posteriormente, el algoritmo realiza la asignación de recursos incluyendo equipos, personal y turnos lo cual ejecuta simulaciones bajo diferentes escenarios operativos mediante técnicas estocásticas. Finalmente, se lleva a cabo una etapa de validación y análisis, en la cual los resultados son comparados con metas productivas y datos históricos, generando reportes que permiten optimizar la secuencia de actividades y fortalecer la toma de decisiones en la operación subterránea. A continuación, se presenta un esquema que resume esta estructura funcional del algoritmo Simprep.

Figura 54

Algoritmo del modelo Simprep.



Fuente: Mina en estudio.

A continuación, se especifica paso por paso los siguientes ítems:

3.4.1 Definición del modelo Simprep

Se establecen los lineamientos generales del modelo de simulación, incluyendo parámetros de avance, condiciones operativas, ciclos de producción, restricciones lógicas y criterios de asignación.

3.4.2 Ingreso del plan mensual (Hitos y precedencias)

Se importa el plan de trabajo, el cual contiene la secuencia lógica de tareas y las relaciones de precedencia necesarias para construir un modelo realista y coherente.

3.4.3 Configuración del modelo de simulación

Se integran los datos importados con la lógica operativa definida en el modelo. En esta etapa también se ajustan reglas, duraciones y condiciones específicas que regirán la simulación.

3.4.4 Definición y asignación de secuencias por área

Se establece la secuencia operativa específica para cada área o frente de trabajo, considerando el orden técnico y las dependencias entre actividades.

3.4.5 Definición de recursos y capacidades

Se especifican los recursos disponibles (equipos, personal, infraestructura) junto con sus respectivas capacidades operativas, rendimiento y restricciones.

3.4.6 Asignación de recursos por secuencia y área

Se asignan los recursos definidos a cada actividad según su ubicación en el tiempo y espacio, asegurando consistencia con la programación lógica y operativa.

3.4.7 Generación de resultados

Una vez definida la configuración completa, se ejecuta la simulación y se generan los resultados: producción mensual, metros de avance, utilización de equipos, etc.

3.4.8 Validación del modelo

Se verifica si la configuración y los resultados presentan inconsistencias operativas o conflictos lógicos (por ejemplo, asignación de recursos superpuestos o secuencias no ejecutables).

3.4.9 ¿La configuración presenta inconsistencias?

Sí: Se retroalimenta el sistema con ajustes y se reinicia desde la configuración del modelo (etapa 3).

No: Se da por válida la simulación.

3.4.10 Reportabilidad final

Se consolidan los resultados y se emiten los reportes requeridos, incluyendo indicadores de producción, utilización, avances y cumplimiento de metas.

Las siguientes figuras ilustran dos componentes fundamentales del control operativo diario: el primero, orientado al seguimiento del estado de los equipos durante el turno; y el segundo, enfocado en la distribución temporal de las tareas de avance.

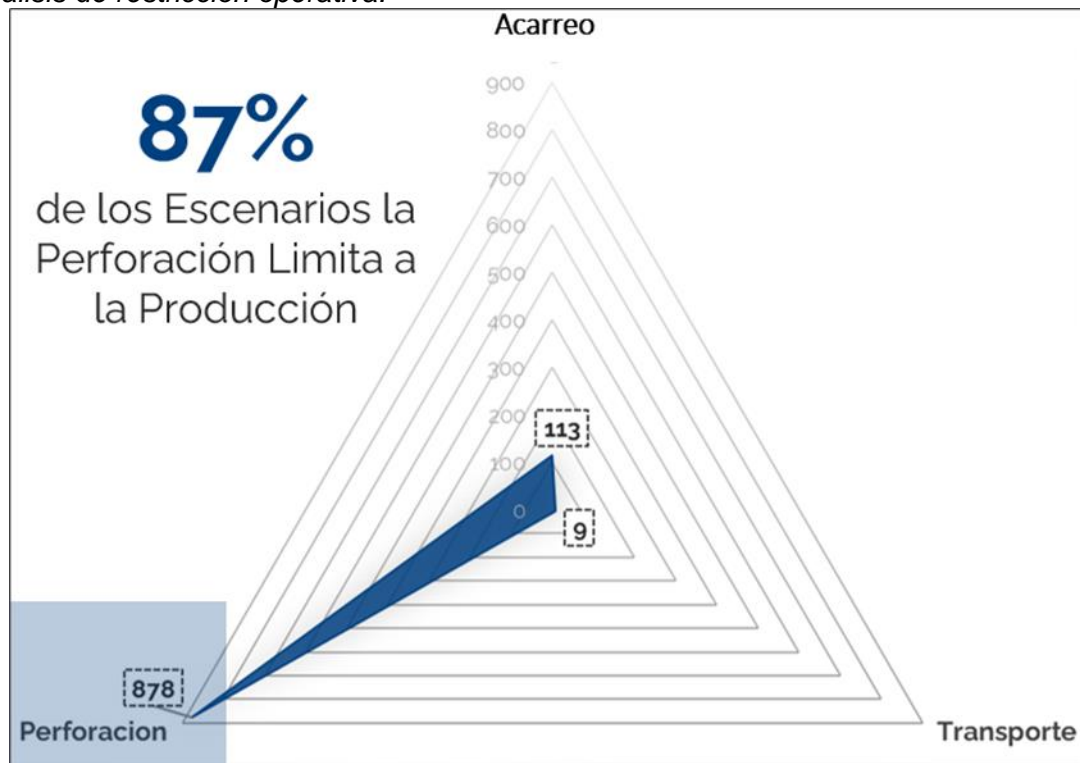
En la figura 55 se observa una importante proporción de tiempo en estado "Parado", especialmente al inicio y final del turno, indicando tiempos improductivos que deben ser evaluados. La etapa operativa se concentra antes y después del período de refrigerio, mientras que las interrupciones por mantenimiento y demoras afectan la continuidad de las labores. Asimismo, se registran horas de traslado, necesarios para la movilidad del equipo entre zonas de trabajo.

La figura 56 evidencia una planificación detallada en la que se busca evitar falencias operacionales, mejorando la secuencia de tareas dentro del tiempo disponible. Se observa una intensa actividad en horas previas al refrigerio, para luego retomar labores críticas como voladura y carguío en horas finales del turno. La representación facilita la identificación de bajos tiempos de espera entre tareas, lo que refleja eficiencia en la transición de actividades.

Se realizó la simulación del ciclo de producción para identificar la actividad que actúa como componente restrictivo dentro de las operaciones unitarias. En base a 1000 realizaciones mostraron que la perforación es la actividad limitante y de menor capacidad, a continuación, se presenta gráficamente el análisis de restricción operativa.

Figura 57

Análisis de restricción operativa.



Fuente: Mina en estudio.

La estadística destaca que en el 87% de los escenarios, la perforación representó el elemento de mayor restricción operativa. Esto se visualiza con claridad en la parte inferior izquierda del diagrama triangular, donde se muestra un valor acumulado de 878 casos asociados a esta limitación. En cambio, el acarreo y el transporte solo fueron cuellos

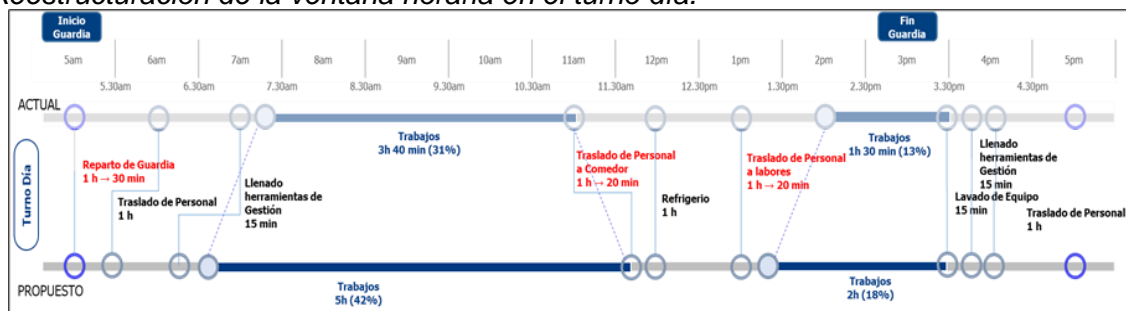
de botella en 113 y 9 casos respectivamente, lo cual representa una participación mucho menor.

Por lo tanto, en la figura 57 refuerza cuantitativamente lo que las distribuciones estadísticas ya sugerían: la perforación representa el eslabón más débil del ciclo productivo, y, por ende, debe ser el foco principal de mejora si se desea incrementar la eficiencia general de la operación minera.

En consecuencia, se lleva a cabo una reestructuración considerando la perforación como la principal limitante, por lo que en las siguientes figuras se realizará un análisis más detallado para ambos turnos.

Figura 58

Reestructuración de la ventana horaria en el turno día.



Fuente: Elaboración propia.

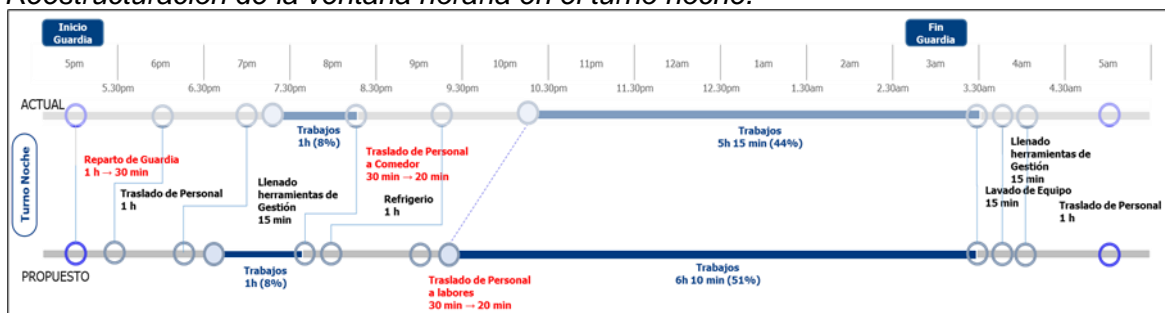
En la figura 58 presenta la ventana horaria del turno día el cual ha evidenciado ineficiencias operativas asociadas a una deficiente distribución de tiempos durante la guardia, siendo la perforación el principal cuello de botella dentro del ciclo minero. Mediante el uso del software de simulación Simprep, se ha analizado el estado actual de la ventana horaria, identificando largos periodos improductivos en los momentos de traslado, reuniones iniciales y cambios de personal, lo cual limita el tiempo efectivo de trabajo.

El análisis actual muestra que las actividades operativas, particularmente la perforación, inician de forma tardía y se ven interrumpidas por ventanas logísticas como el almuerzo y el cambio de turno, reduciendo el tiempo neto de trabajo a tan solo 5.17 horas (44% de la jornada). Esta fragmentación reduce la continuidad del ciclo productivo, afectando negativamente la programación diaria y la eficiencia general de la operación.

La propuesta de reestructuración busca mejorar el uso del tiempo mediante el inicio más temprano de las actividades operativas (inicio 6:30 a.m.) y una mejor coordinación de los traslados y pausas. Esta mejora permitiría alcanzar hasta 7 horas de trabajo efectivo (60% de la jornada), reduciendo tiempos muertos y mejorando el rendimiento de los equipos y personal.

Figura 59

Reestructuración de la ventana horaria en el turno noche.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 59 presenta la ventana horaria del turno noche el cual evidencia una oportunidad clave para mejorar la continuidad del ciclo minero. Sin embargo, el análisis del estado actual mediante simulación con Simprep revela que existen pérdidas significativas de tiempo asociadas al inicio tardío de las actividades operativas, así como a traslados prolongados y pausas mal coordinadas. En este turno, al igual que en el turno día, la perforación ha sido identificada como el principal cuello de botella que limita la productividad general.

El esquema actual muestra que la perforación comienza alrededor de las 10:30 p.m., tras una serie de actividades logísticas que consumen horas improductivas desde el inicio de la guardia. Esto limita el tiempo efectivo de trabajo a 5.25 horas (52%), mientras que el resto de la guardia se pierde entre traslados, reuniones, y tiempos muertos por reorganización del personal. Esta situación compromete la eficiencia del turno noche, afectando la preparación oportuna de frentes para el siguiente día.

La propuesta de reestructuración plantea una mejora en la ventana horaria, permitiendo iniciar actividades operativas antes (inicio 6:30 p.m.), reorganizando los traslados de personal y reduciendo los tiempos improductivos. Por lo tanto, se logra

extender el tiempo efectivo de trabajo a 7.17 horas (59%), aumentando significativamente la capacidad de perforación y la eficiencia del turno.

En conclusión, la implementación de esta nueva ventana horaria permitiría mitigar el cuello de botella en perforación, aumentar la producción, productividad y obtener un mayor índice de utilización de los equipos durante las operaciones.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Análisis de los resultados de la investigación

4.1.1 Mejora en la productividad de los equipos

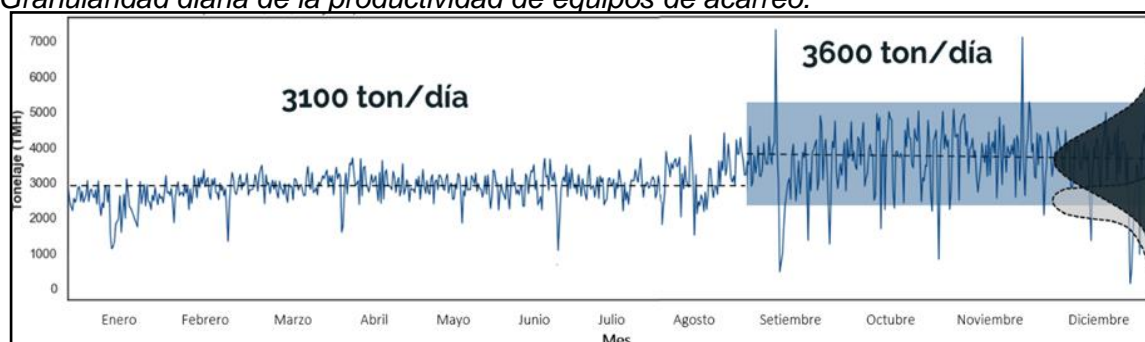
4.1.1.1 Equipos de acarreo. Durante el año 2023, la productividad del equipo Scooptram mostró una mejora considerable en el último cuatrimestre del año. Hasta el segundo cuatrimestre del año, el rendimiento promedio se mantuvo en torno a 3.100 toneladas métricas húmedas por día, reflejando una operación relativamente estable, pero con márgenes limitados de eficiencia. Sin embargo, en el tercer cuatrimestre, dicho promedio aumentó a aproximadamente 3,600 TMH/día, lo que representa un incremento del 40%. Este crecimiento sostenido sugiere una mejora operativa significativa y estructurada a lo largo del tiempo.

La implementación del Simprep permitió mejorar los ciclos de carga y acarreo, y reducir errores operativos frecuentes. A partir del mes de setiembre, la curva de productividad muestra una tendencia ascendente clara, con una mayor frecuencia de días superando las 3,600 toneladas diarias.

Esto indica no solo un aumento en la capacidad operativa, sino también una mayor confianza y eficiencia por parte del personal. A continuación, se presenta mediante la siguiente figura la productividad diaria en toneladas acarreadas.

Figura 60

Granularidad diaria de la productividad de equipos de acarreo.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 60 muestra que la distribución de densidad del primer y segundo cuatrimestre (curva clara) está concentrada en valores bajos y presenta poca variabilidad,

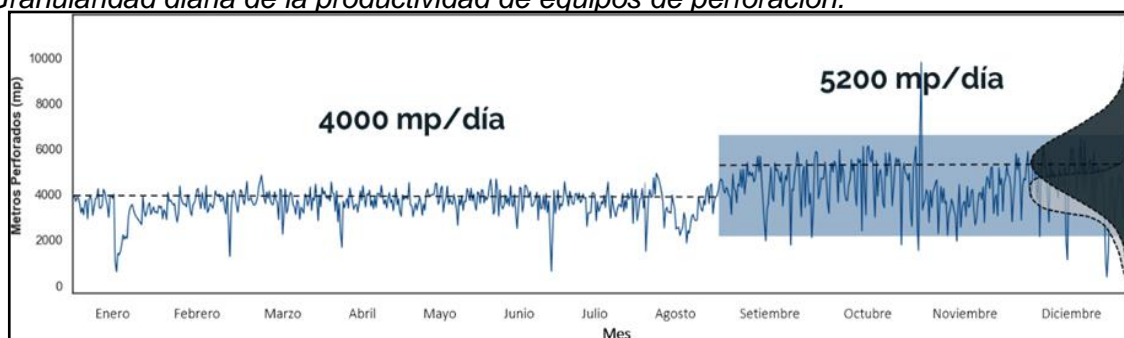
reflejando un rendimiento limitado. En cambio, la del tercer cuatrimestre (curva oscura) se desplaza hacia valores más altos, con mayor variabilidad y más días de alta productividad, evidenciando un mayor aprovechamiento del potencial operativo.

4.1.1.2 Equipos de perforación. De la misma manera la productividad del equipo jumbo frontonero experimentó una mejora significativa al comparar los resultados operativos de los dos primeros cuatrimestres con respecto al último cuatrimestre del año. Hasta agosto, se registró un rendimiento promedio de 4000 metros perforados por día, lo cual refleja un nivel de productividad estable, aunque con márgenes limitados para alcanzar mayores eficiencias. En contraste, durante el tercer cuatrimestre del año, el promedio mensual se elevó a 5200 mp/día, representando un incremento del 30%, que sugiere mejoras operativas concretas y sostenidas en el tiempo.

La implementación del Simprep permitió reducir errores comunes y mejorar el ciclo de trabajo en los frentes de avance. La curva de productividad a partir de setiembre muestra un comportamiento ascendente, con una mayor frecuencia de días por encima del umbral de los 5200 metros diarios. Asimismo, se observa una menor dispersión en los valores diarios, lo cual refleja una mayor consistencia y control operacional por parte del equipo humano. La siguiente figura muestra la productividad diaria en metros perforados.

Figura 61

Granularidad diaria de la productividad de equipos de perforación.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 61 muestra, mediante las distribuciones de densidad, una mejora clara en la productividad entre cuatrimestres. La curva clara abarca los 2 primeros cuatrimestres el cual se concentra cerca de los 4000 mp/día con baja dispersión, indicando un rendimiento

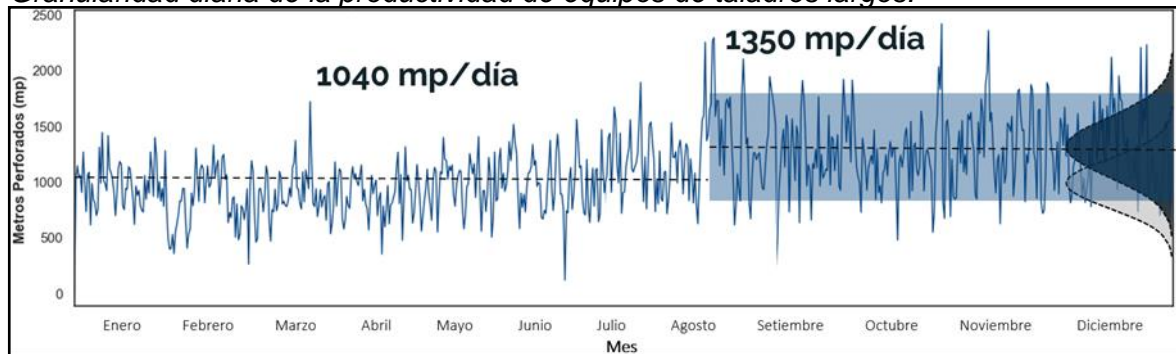
estable pero limitado. En contraste, la curva oscura del tercer cuatrimestre se desplaza hacia los 5200 mp/día, con mayor concentración y media más alta, reflejando un incremento en la productividad y un mejor nivel técnico de los operadores.

4.1.1.3 Equipos de taladros largos. Asimismo, la productividad diaria del equipo jumbo de taladros largos mostró una mejora sustancial en el tercer cuatrimestre. Hasta agosto, se registró un promedio de aproximadamente 1,040 metros perforados por día, reflejando un desempeño estable, pero con oportunidades de optimización. A partir del último cuatrimestre, este promedio aumentó a 1,350 mp/día, lo que representa una mejora del 30% y evidencia un avance operativo sostenido en el tiempo.

Este incremento en la productividad se atribuye principalmente a la implementación de un simulador operativo, herramienta que permitió reducir errores y optimizar los ciclos de trabajo. Desde setiembre, se observa un comportamiento más ascendente en la curva de rendimiento diario, con una mayor frecuencia de días superando el umbral de los 1350 metros perforados (mp), señal de un proceso más eficiente y controlado.

Figura 62

Granularidad diaria de la productividad de equipos de taladros largos.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 62 muestra que la distribución de densidad evidencia la mejora en productividad: la curva clara de los dos primeros cuatrimestres se concentra en torno a 1,040 mp/día con menor variabilidad, mientras que la curva oscura del tercer cuatrimestre se desplaza hacia 1,350 mp/día y muestra mayor amplitud, indicando más días con alto rendimiento y un mejor aprovechamiento del potencial operativo.

4.1.2 Cumplimiento de avances de frentes de preparación

La mejora en la productividad del equipo jumbo frontonero, evidenciada por el incremento sostenido de metros perforados tras la implementación del simulador operativo, influye directamente en el cumplimiento oportuno de los avances en preparación, al permitir una mayor continuidad operativa y acelerar el desarrollo de labores de preparación. Esta mejora, además, se ve potenciada por el incremento paralelo en la productividad del equipo Scooptram, cuya mayor eficiencia en el acarreo de material ha contribuido a reducir los tiempos de limpieza y evacuación de frentes, minimizando cuellos de botella y asegurando una secuencia fluida entre perforación, voladura y carga. En conjunto, estos avances en productividad fortalecen el cumplimiento del plan de preparación del tajeo, optimizando los recursos disponibles y reduciendo desviaciones frente a la planificación minera.

Tabla 3

Metros ejecutados de avances en preparación por mes.

AVANCES DE PREPARACIÓN			
MES	METROS EJECUTADOS	METROS PROGRAMADOS	% CUMPLIMIENTO
Ene	1,016	1,536	66%
Feb	980	1,402	70%
Mar	1,033	1,551	67%
Abr	1,062	1,496	71%
May	1,036	1,534	68%
Jun	1,054	1,502	70%
Jul	1,092	1,542	71%
Ago	1,193	1,550	77%
Sep	1,382	1,528	90%
Oct	1,549	1,686	92%
Nov	1,492	1,601	93%
Dic	1,541	1,661	93%

Fuente: Mina en estudio.

De la tabla 3, el análisis de los avances ejecutados frente a lo programado en los frentes de preparación evidencia una variabilidad significativa en los niveles de cumplimiento a lo largo del periodo evaluado.

Durante la etapa inicial, se observan valores por debajo del umbral óptimo, reflejando limitaciones en la planificación operativa, disponibilidad de recursos y capacidad de respuesta ante condiciones cambiantes.

Con la implementación del software de simulación Simprep, se registra una mejora progresiva en los indicadores de cumplimiento. Este sistema permitió optimizar la programación de actividades, mejorar la coordinación de equipos y reducir las desviaciones entre lo planificado y lo ejecutado. Además, a través del análisis de escenarios, Simprep permitió identificar que el principal cuello de botella en el proceso era la etapa de perforación, lo cual permitió enfocar esfuerzos en la reestructuración de dicho proceso. A continuación, se muestra una tabla con los datos de los metros ejecutados con respecto a los avances en preparación correspondientes a cada mes.

4.1.3 Incremento de la producción de mineral de tajeos

La mejora conjunta en la productividad de los equipos clave del ciclo operativo, es decir el incremento en metros perforados por el jumbo frontonero, la mayor eficiencia en el acarreo por parte del Scooptram y el aumento sostenido en la perforación de taladros largos influyen directamente en el incremento de la producción de mineral. La aceleración del avance de labores mediante jumbos frontoneros permite habilitar zonas productivas con mayor anticipación, mientras que la mejora en el acarreo garantiza la evacuación oportuna del material, liberando frentes operativos. A su vez, el desempeño optimizado de los jumbos de taladros largos, impulsado por el uso de simuladores operativos, permite una planificación más eficiente, reducción de ciclos de perforación y voladura con una mayor disponibilidad de mineral explotable.

Este encadenamiento técnico-operativo genera una sinergia que impacta positivamente en el cumplimiento del plan de minado y en el aumento sostenido de toneladas de mineral enviadas a planta, contribuyendo a una operación más rentable y técnicamente eficiente.

Tabla 4*Toneladas extraídas por mes.*

PRODUCCIÓN DE TAJEOS			
MES	TONELADAS EJECUTADAS	TONELADAS PROGRAMADAS	% CUMPLIMIENTO
Ene	61,147	78,341	78%
Feb	57,458	75,846	76%
Mar	61,428	78,284	78%
Abr	60,524	78,541	77%
May	62,456	78,772	79%
Jun	61,865	78,465	79%
Jul	63,542	78,258	81%
Ago	62,387	78,473	80%
Sep	75,148	78,804	95%
Oct	76,395	78,351	98%
Nov	77,115	78,267	99%
Dic	77,521	78,345	99%

Fuente: Mina en estudio.

El análisis de la producción de tajeos muestra una baja eficiencia operativa durante los primeros ocho meses del año, con cumplimientos entre 76% y 81%, evidenciando desviaciones respecto a la planificación. Esta variabilidad operativa reflejó deficiencias en la asignación de recursos y secuenciamiento de labores, lo cual justificó la necesidad de implementar un modelo de simulación para optimizar el sistema.

A partir de septiembre, tras la aplicación del simulador, se registró una mejora sostenida en el cumplimiento, alcanzando valores del 95% al 99%. Esta tendencia positiva indicó que la simulación permitió ajustar procesos críticos, reducir cuellos de botella y mejorar la eficiencia general, logrando una mayor alineación entre lo programado y lo ejecutado.

4.2 Discusión de resultados

En síntesis, la implementación del simulador Simprep no solo mejoró la producción de tajeos, sino que también elevó el estándar técnico de los operadores, reduciendo la dependencia de factores externos como condiciones del terreno o disponibilidad mecánica.

La consistencia operativa alcanzada durante el tercer cuatrimestre evidencia una mayor profesionalización y control del proceso operativo.

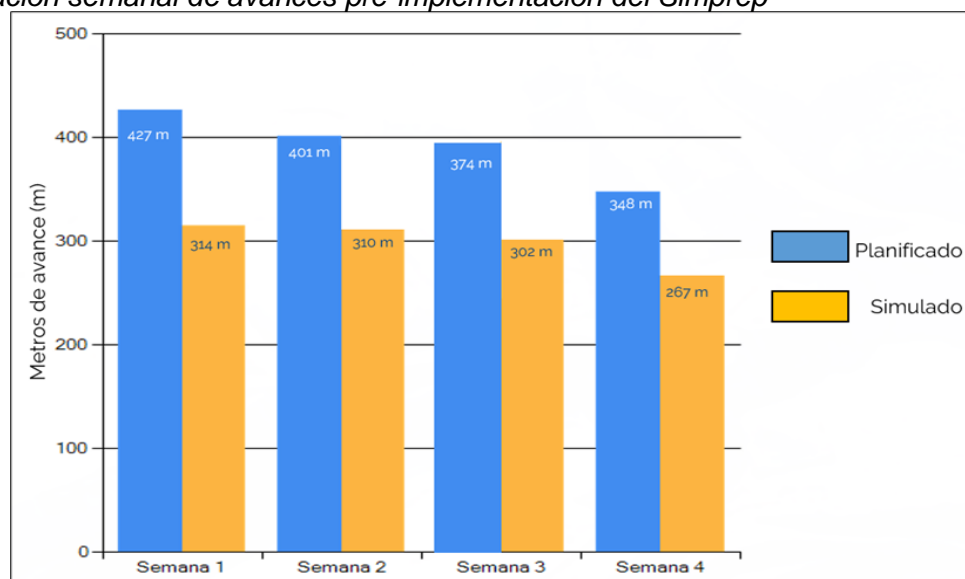
Es decir, no solo permitió mejorar las métricas de producción de tajeos, sino que también fortaleció la ejecución técnica del equipo humano, promoviendo una cultura de mejora continua y eficiencia operativa. Esta experiencia refuerza la importancia de integrar tecnologías de simulación como herramientas estratégicas dentro de los programas de capacitación minera, no solo para entrenar habilidades, sino para transformar el desempeño operativo de manera sostenible.

4.2.1 Incremento en el cumplimiento de los avances en preparación

Durante el desarrollo del presente estudio, se evaluaron los avances en preparación correspondientes a los meses de agosto y octubre, con el objetivo de analizar el impacto de la implementación del software Simprep. En agosto, dicho software aún no se encontraba operativo, por lo que las simulaciones presentaban desviaciones importantes respecto a la planificación. En cambio, en octubre, tras su implementación y calibración, se observó una mejora sustancial tanto en los avances en preparación como en el cumplimiento general. A continuación, se detallan las figuras comparativas y su interpretación correspondiente.

Figura 63

Calibración semanal de avances pre-implementación del Simprep

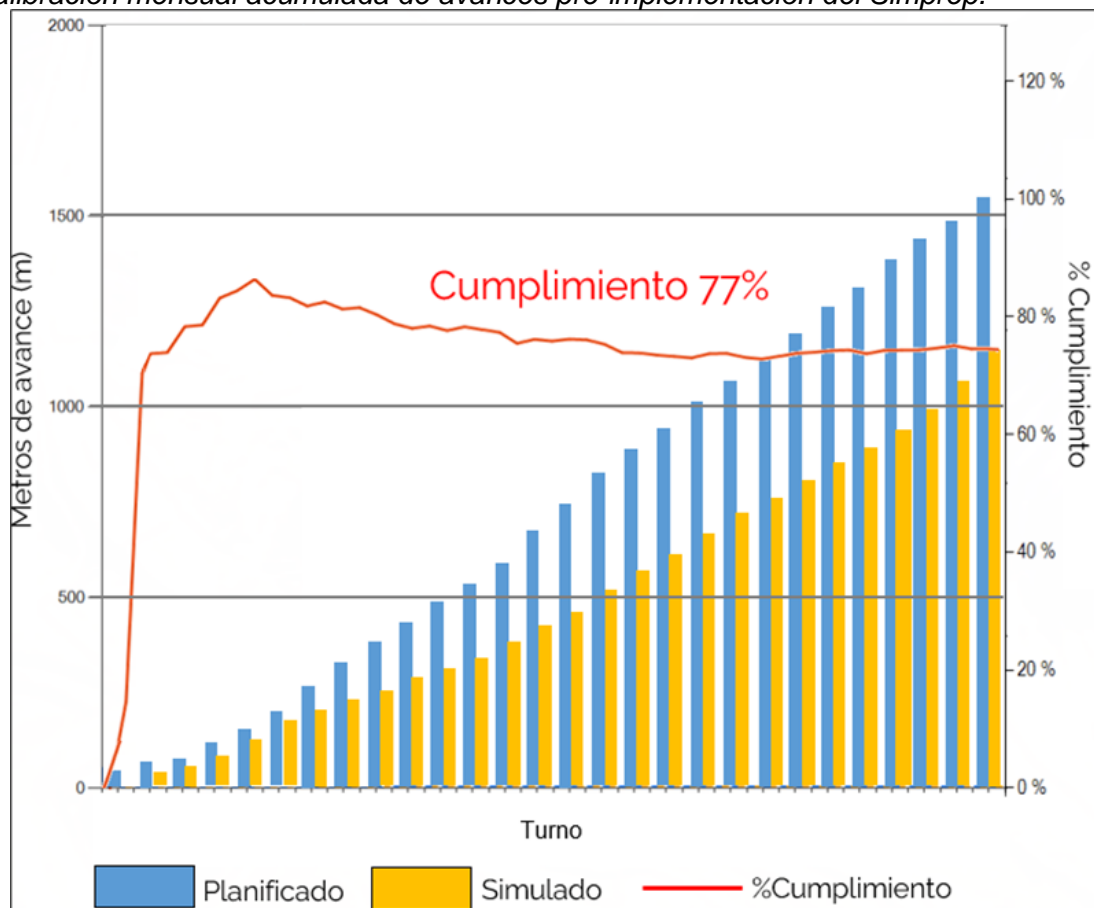


Fuente: Software Simprep.

La figura 63 muestra la comparación entre los avances planificados y los simulados por semana durante el mes de agosto. En esta etapa, sin contar aún con el soporte del software Simprep, se evidencian desviaciones considerables en todas las semanas. Por ejemplo, en la semana 1 se planificaron 427 metros de avance, mientras que la simulación proyectó solo 314 metros, con una diferencia del 26.5%. Situación similar ocurre en la semana 4, donde se planificaron 348 metros y se simularon 267 metros, con una desviación del 23.3%. Estas discrepancias reflejan una baja eficiencia operativa, atribuida principalmente al uso subóptimo de los equipos de perforación y acarreo, así como a la falta de herramientas de análisis predictivo que permitieran una planificación más precisa.

Figura 64

Calibración mensual acumulada de avances pre-implementación del Simprep.



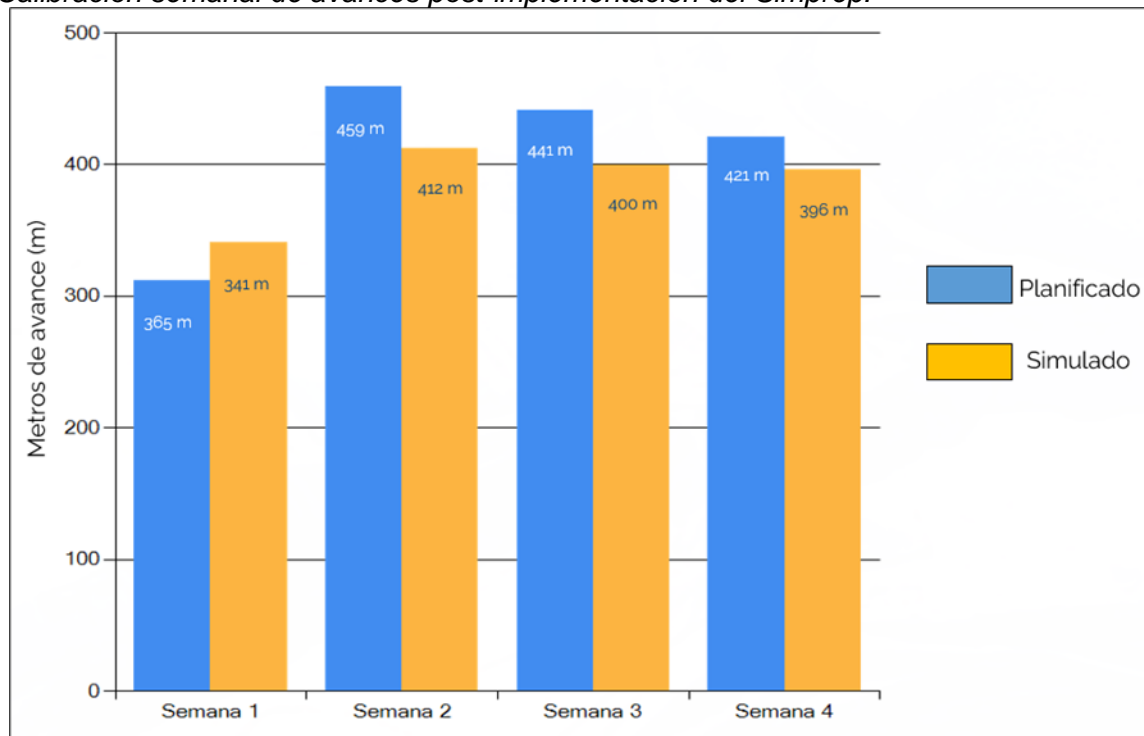
Fuente: Software Simprep.

La figura 64 representa la curva de avance acumulado diario y el % de cumplimiento en el mes de agosto. Se observa que, aunque al inicio del mes el cumplimiento crece de forma acelerada, este se estanca progresivamente, estabilizándose en torno al 77%. Este

comportamiento evidencia que las condiciones operativas no se encontraban alineadas con la planificación inicial. La baja utilización de los equipos y la falta de visibilidad sobre los cuellos de botella operativos impidieron alcanzar las metas propuestas. En ausencia del software Simprep, no fue posible realizar una retroalimentación efectiva que permitiera ajustar las estrategias de avance durante el mes.

Figura 65

Calibración semanal de avances post-implementación del Simprep.

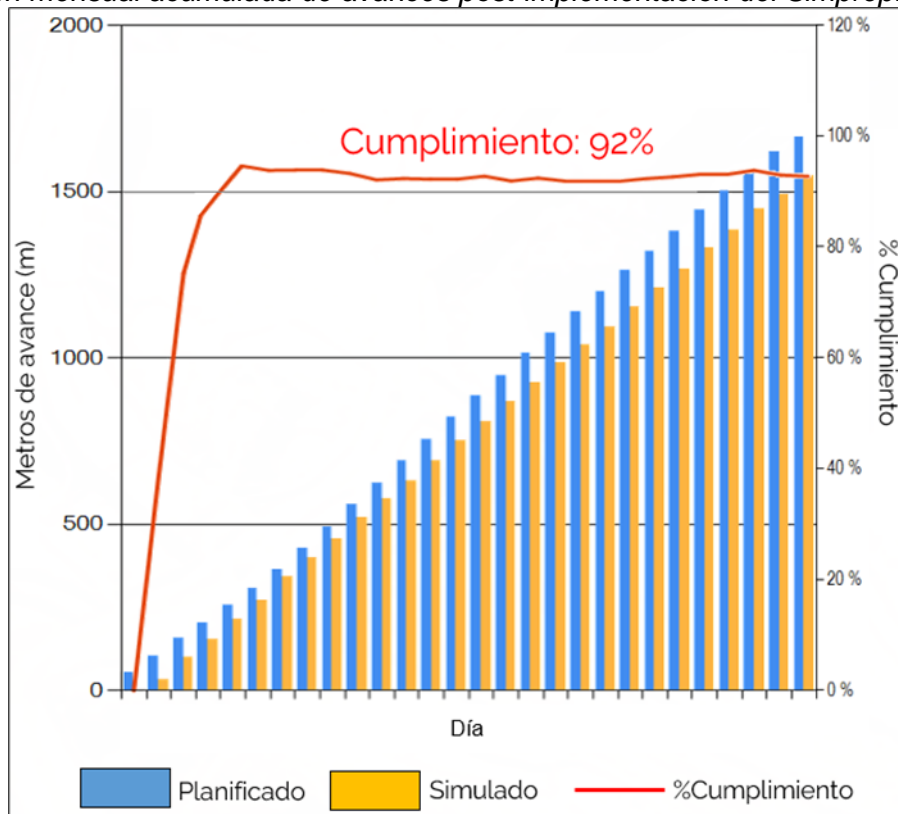


Fuente: Software Simprep.

La figura 65 muestra la comparación semanal de los avances planificados y simulados durante el mes de octubre, ya con el software Simprep completamente implementado y calibrado. En este periodo, se observa una correspondencia mucho más estrecha entre los valores planificados y los simulados. En la semana 2, por ejemplo, se planificaron 459 metros y se simularon 412 metros, con una desviación de solo 10.2%. En la semana 4, la diferencia se reduce aún más, alcanzando apenas un 5.9%. Esta mejora significativa en la precisión de la simulación se relaciona directamente con el uso del software, el cual permitió identificar falencias operativas, optimizar el uso de recursos, y mejorar la secuencia de trabajo de los equipos.

Figura 66

Calibración mensual acumulada de avances post-implementación del Simprep.



Fuente: Software Simprep.

La figura 66 presenta el avance acumulado diario y el % de cumplimiento durante el mes de octubre. A diferencia del mes de agosto, aquí se observa una curva de cumplimiento estable, que se mantiene en torno al 92% durante casi todo el mes. Esta estabilidad y alto nivel de cumplimiento reflejan una operación mucho más eficiente, producto del análisis y retroalimentación continua proporcionada por el software Simprep. Con el soporte del Simprep se logró una mayor utilización de los equipos de perforación y acarreo, así como una mejor coordinación entre turnos y una reducción significativa de los tiempos improductivos. El software no solo permitió simular con precisión, sino también optimizar las decisiones operativas en función de datos reales.

En resumen, el análisis gráfico y cuantitativo de los avances en agosto y octubre demuestra que la implementación del software Simprep tuvo un impacto directo en la mejora de los indicadores operativos. El cumplimiento aumentó del 77% al 92%, y las desviaciones semanales se redujeron considerablemente. Estos resultados validan la

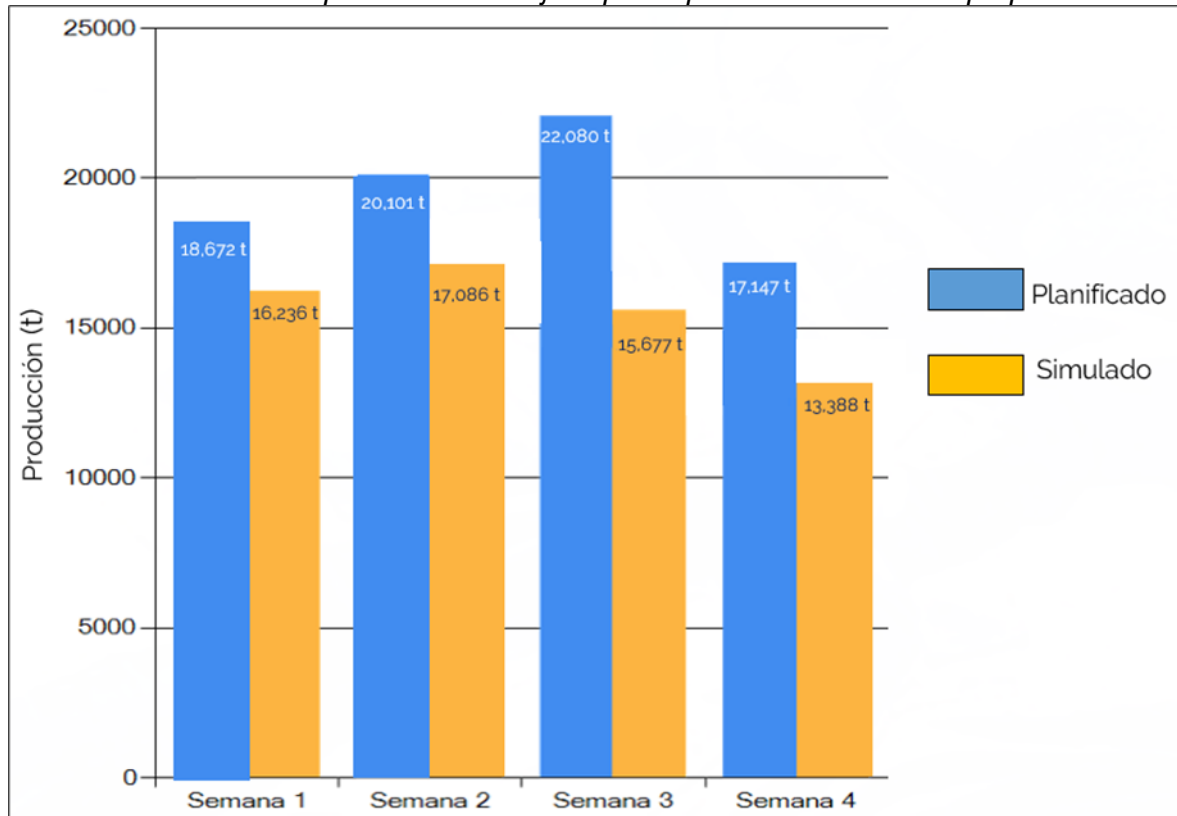
utilidad del software como herramienta de apoyo en la planificación y control de la preparación minera subterránea, reforzando la importancia de incorporar tecnologías predictivas en la gestión minera moderna.

4.2.2 Incremento en el cumplimiento de producción de tajeos

Luego de analizar los avances en preparación, es imprescindible evaluar el comportamiento del sistema en términos de producción, dado que este parámetro refleja directamente el impacto operativo de los procesos de perforación, carguío y acarreo. Tal como en el caso anterior, se realizó la comparación entre los valores planificados y simulados mediante el software Simprep, considerando que en esta instancia el rendimiento del equipo de taladros largos cobra un rol determinante en el cumplimiento de los objetivos de producción. La evolución entre los escenarios de agosto (sin uso del software) y octubre (con la herramienta ya implementada) permite identificar de forma clara las mejoras operativas alcanzadas.

Figura 67

Calibración semanal de producción de tajeos pre-implementación del Simprep.

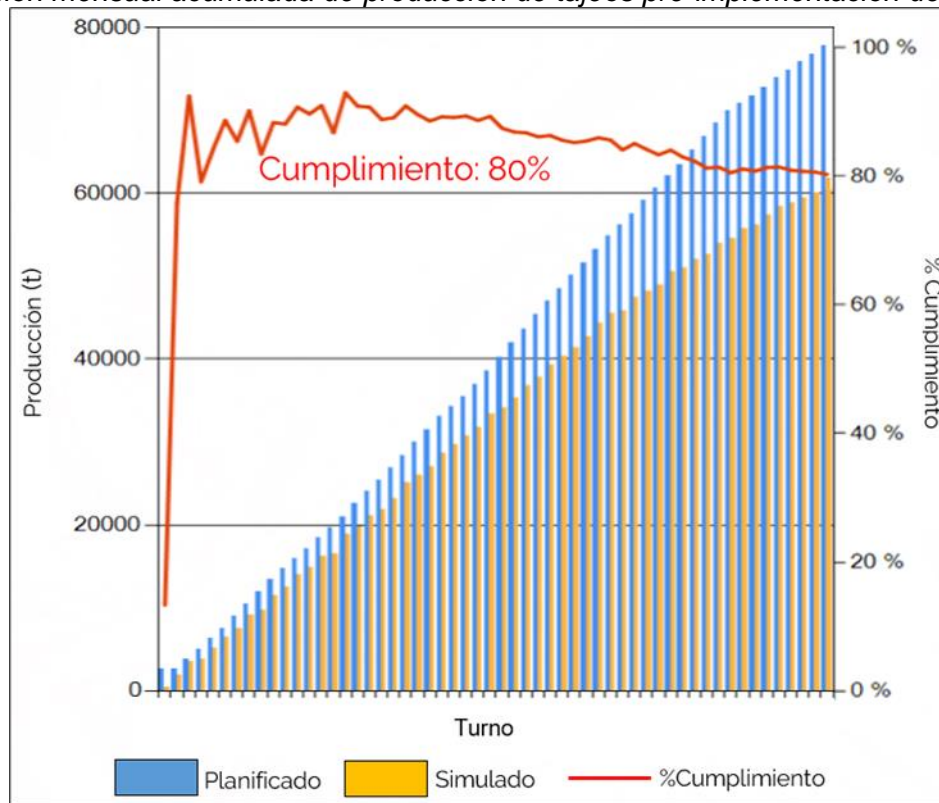


Fuente: Software Simprep.

Durante el mes de agosto, en el que aún no se contaba con la implementación de Simprep, las diferencias entre lo planificado y lo simulado fueron notoriamente elevadas. En la semana 2, se programó una producción de 20,101 toneladas, pero el modelo simulado estimó solo 17,086 toneladas, lo que representa un desfase del 15%. La semana 4 acentuó aún más esta tendencia, con una diferencia superior al 22%. Estas discrepancias se explican principalmente por la baja utilización de equipos de perforación y acarreo, y la falta de retroalimentación sistemática sobre los rendimientos reales, lo cual impedía ajustar la planificación diaria a condiciones reales del frente de trabajo.

Figura 68

Calibración mensual acumulada de producción de tajeos pre-implementación del Simprep



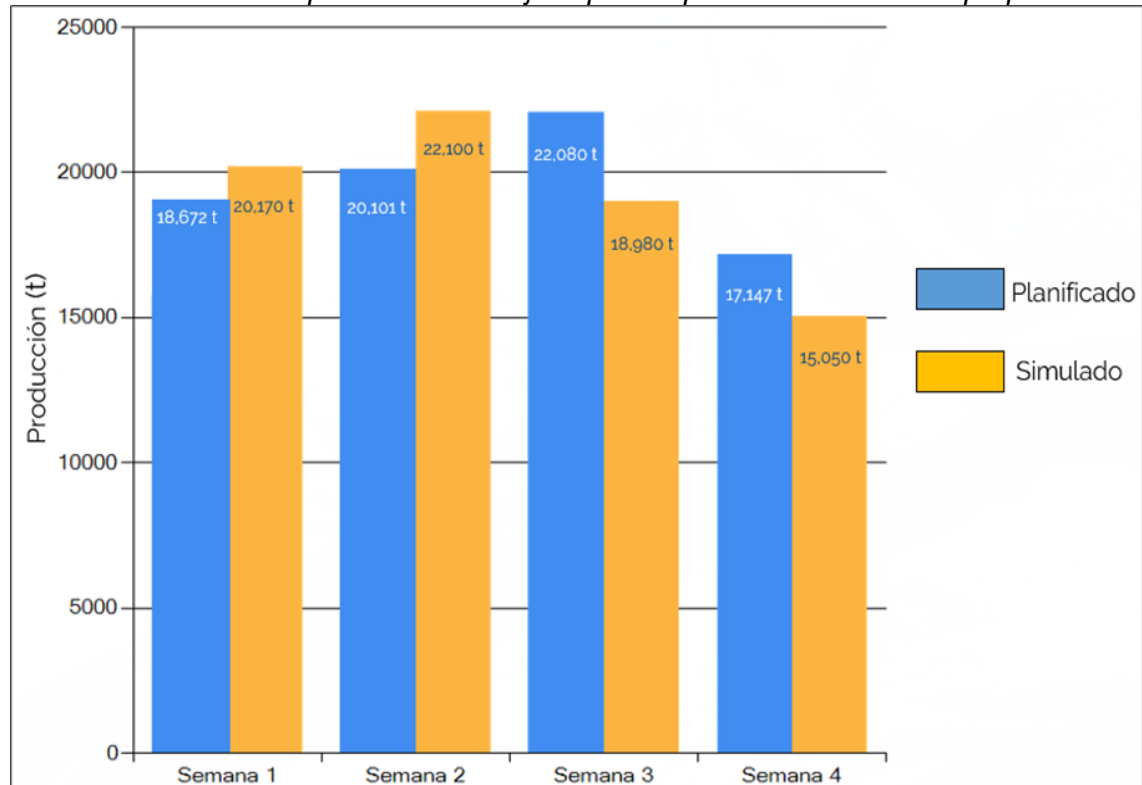
Fuente: Software Simprep.

La curva acumulada de producción para agosto refleja una tendencia positiva, pero con una tasa de cumplimiento promedio del 80%. A medida que avanzan los días, se observa una pérdida progresiva en la capacidad de alcanzar los objetivos, lo que evidencia que la planificación no se sostenía bajo las condiciones reales de operación.

Esto responde a limitaciones estructurales en la planificación convencional, donde la falta de herramientas predictivas como Simprep restringía el análisis profundo de cuellos de botella, como demoras en perforación, sobrecarga de equipos de acarreo o ineficiencia en la ventilación de frentes activos.

Figura 69

Calibración semanal de producción de tajeos post-implementación del Simprep.

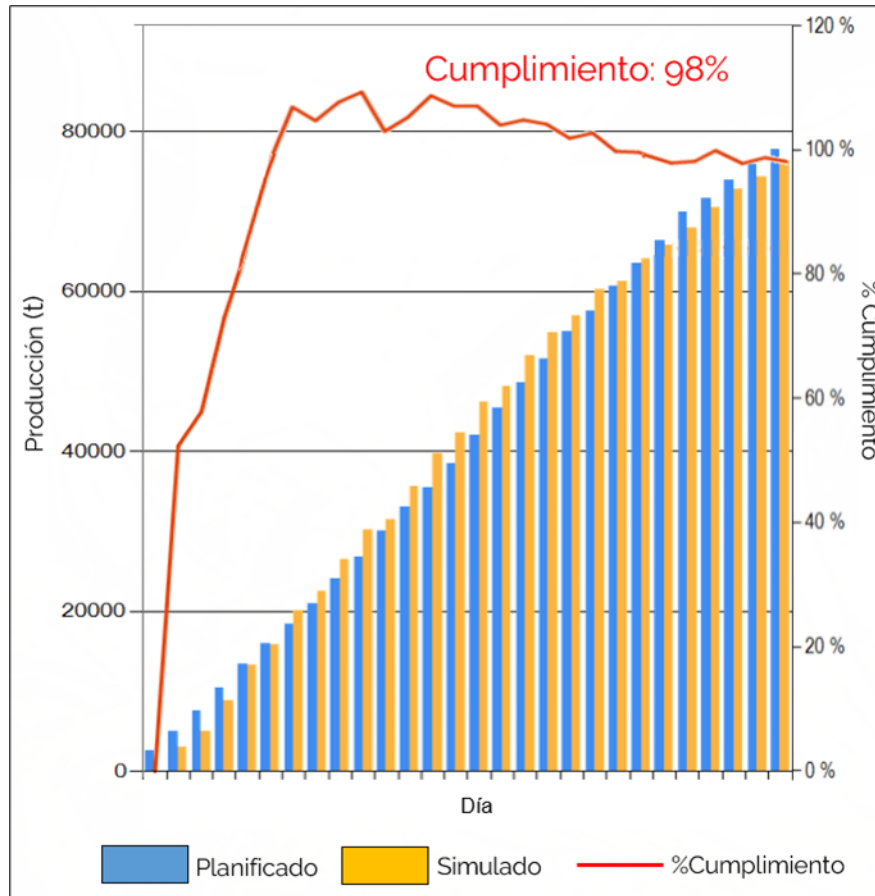


Fuente: Software Simprep.

Una vez implementado el software Simprep y con sus parámetros debidamente calibrados, el comportamiento del sistema cambia notablemente en octubre. La correspondencia entre las toneladas planificadas y simuladas se vuelve más ajustada. En la semana 2, incluso se alcanza una simulación de 22,100 toneladas frente a las 20,101 toneladas planificadas, lo cual sugiere una mayor eficiencia en la ejecución. La diferencia en la semana 4 es de apenas 10%, mucho menor en comparación con el mes de agosto. Esta mejora responde a una planificación basada en datos históricos reales, rendimientos operativos por equipo y tiempos efectivos, especialmente en la operación de taladros largos.

Figura 70

Calibración mensual acumulada de producción de tajeos post-implementación del Simprep.



Fuente: Software Simprep.

El impacto del software Simprep queda aún más evidente al analizar la evolución diaria de la producción en octubre. La curva de cumplimiento se mantiene estable y cercana al 100%, alcanzando un promedio del 98%. Esta mejora se debe a la identificación y corrección de falencias previamente observadas, tales como tiempos muertos no registrados, baja rotación de flota de acarreo y secuencias de perforación mal definidas. Con el aporte del Simprep y ajuste continuo de parámetros operativos, se logró sincronizar con mayor precisión los ciclos productivos, permitiendo alcanzar altos niveles de eficiencia y confiabilidad operativa.

En resumen, el análisis conjunto de preparación y producción confirma que la implementación del software Simprep no solo permite predecir con mayor exactitud los resultados operativos, sino también actuar sobre ellos de manera anticipada. El salto de cumplimiento de 80% a 98% en producción y la drástica reducción en las brechas de

planificación validan la herramienta como una solución integral para la mejora continua en operaciones subterráneas. En particular, su impacto sobre el rendimiento de los taladros largos fortalece la capacidad de mantener la continuidad operativa y optimizar el uso de recursos.

4.2.3 Impacto positivo en los Costos Operativos (OPEX)

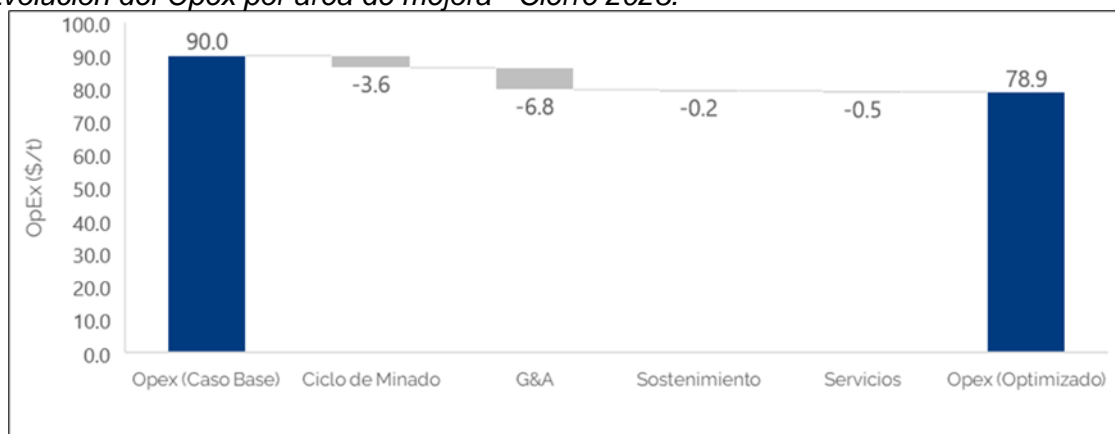
La implementación del software Simprep generó un impacto positivo integral en la operación minera, optimizando tanto la planificación como la ejecución del ciclo de minado subterráneo. La mayor utilización de equipos, la reducción de demoras operativas y la mejor sincronización de actividades entre frentes permitieron mejorar la productividad sin necesidad de realizar inversiones adicionales en maquinaria.

Esta mejora operativa se tradujo en una reducción del costo operativo (OPEX) de 90 a 86.4 \$/ton, es decir, un ahorro unitario de 3.6 \$/ton, equivalente al 4%. Considerando un valor de mineral de 149 \$/ton, la disminución del OPEX incrementa el margen operativo en aproximadamente 2.4% por tonelada, lo cual mejora directamente la rentabilidad de la operación. Este impacto financiero, junto con la eficiencia técnica alcanzada, posiciona a Simprep como una herramienta clave para la optimización operativa y la toma de decisiones basada en datos en minería moderna.

La Figura 71 ilustra la evolución del OPEX al cierre del año 2023, destacando las principales áreas que contribuyeron a la mejora frente al escenario base.

Figura 71

Evolución del Opex por área de mejora - Cierre 2023.



Fuente: Mina en estudio.

4.3 Contrastación de hipótesis

Mediante la implementación del software Simprep, se desarrolló un modelo de simulación enfocado en la evaluación y optimización de distintos escenarios operativos. Esta herramienta permitió identificar proactivamente cuellos de botella, optimizar la asignación de recursos disponibles y ajustar parámetros operacionales críticos, con énfasis en los procesos asociados a perforación, acarreo y operación de taladros largos. La capacidad del modelo para representar dinámicamente el comportamiento del sistema productivo facilitó la toma de decisiones operativas con un enfoque predictivo y adaptativo.

Como resultado de dicha implementación, se observó un incremento sostenido y cuantificable en la productividad minera, reflejado en el aumento de la producción semanal promedio desde 3100 hasta 3600 toneladas, lo cual constituye una mejora del 16.1 %. Este resultado evidencia el impacto directo de la simulación en la optimización del rendimiento global del sistema.

Adicionalmente, el nivel de cumplimiento de las metas de producción de tajeos mostró una mejora significativa, pasando de un 80 % a un 98 %, lo que demuestra una mayor adherencia a la planificación minera y una reducción efectiva en las desviaciones operativas. En conjunto, estos resultados cuantitativos validan la efectividad del modelo basado en simulación como herramienta de soporte a la toma de decisiones estratégicas, contribuyendo de manera sustancial al logro de las metas físicas y a la mejora continua de la eficiencia operativa.

Tabla 5

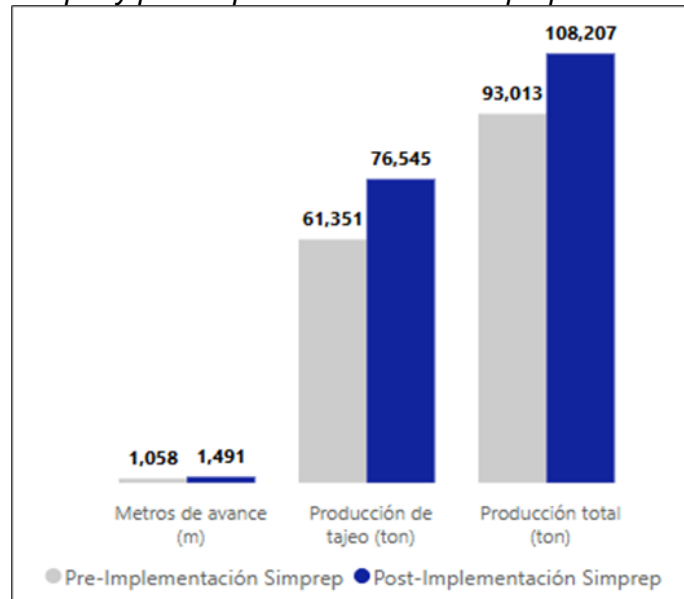
Comparativo del desempeño operativo

ITEM	CRITERIO	PRE-IMPLEMENTACIÓN SIMPREP	POST-IMPLEMENTACIÓN SIMPREP
1	Metros de avance (m)	1,058	1,491
2	Producción de tajeos	61,351	76,545
3	Producción total (ton)	93,013	108,207

Fuente: Elaboración propia.

Figura 72

Desempeño operativo pre y post implementación de Simprep



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

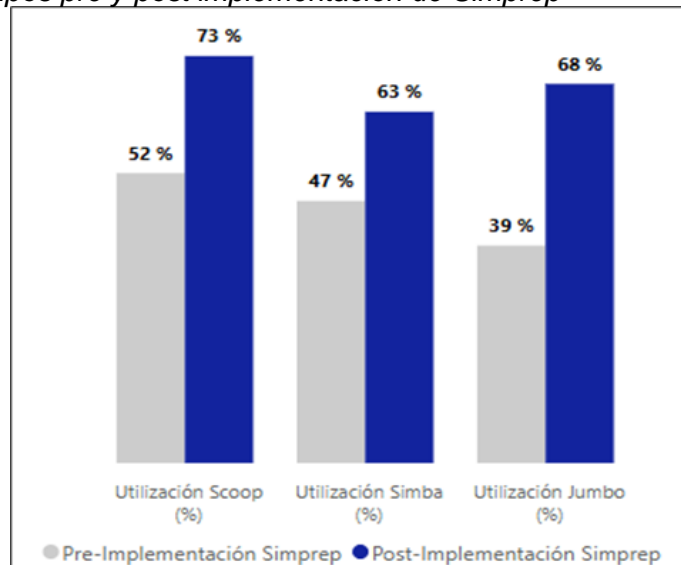
Comparativo de utilización de equipos

ITEM	CRITERIO	PRE-IMPLEMENTACIÓN SIMPREP	POST-IMPLEMENTACIÓN SIMPREP
4	Utilización Scoop (%)	52%	73%
5	Utilización Simba (%)	47%	63%
6	Utilización Jumbo (%)	39%	68%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 73

Utilización de equipos pre y post implementación de Simprep



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7

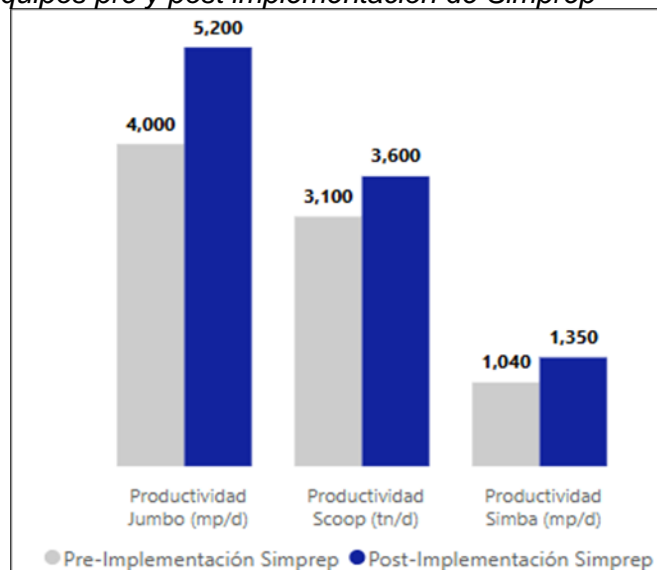
Comparativo de productividad de equipos

ITEM	CRITERIO	PRE-IMPLEMENTACIÓN SIMPREP	POST-IMPLEMENTACIÓN SIMPREP
7	Productividad Jumbo (mp/d)	4,000	5,200
8	Productividad Scoop (ton/d)	3,100	3,600
9	Productividad Simba (mp/d)	1,040	1,350

Fuente: Elaboración propia.

Figura 74

Productividad de equipos pre y post implementación de Simprep



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los indicadores operativos antes y después de aplicar el software Simprep permite validar la hipótesis del estudio, evidenciando un aumento promedio de 500 toneladas diarias en la producción total de mineral. Este resultado se atribuye a una mejor planificación secuencial, reducción de tiempos improductivos y asignación eficiente de recursos.

Dicho incremento está asociado al mayor rendimiento de los equipos de perforación, donde el jumbo frontonero pasó de 4,000 a 5,200 metros diarios, y el Simba, de 1,040 a 1,350 metros diarios. Esta mejora ha favorecido la continuidad del ciclo de minado, confirmando la utilidad del simulador como herramienta para elevar la productividad del sistema operativo subterráneo.

Luego de evaluar los valores obtenidos de los indicadores de productividad antes y después de la implementación propuesta, se procede a la validación de la hipótesis alterna (H_a) planteada en el presente estudio. Para ello, se aplicó la prueba estadística t de Student para una muestra simple, con el fin de analizar si las diferencias observadas en la productividad son estadísticamente significativas.

Para nuestro caso:

μ : 3,100 (es el valor de la productividad media previo a la implementación del software Simprep).

Valor de significancia: 5% (valor que asumimos para el tipo de investigación).

Por lo tanto:

$H_0 = 3,100$

$H_a > 3,100$, es decir el valor de la hipótesis tiene que ser mayor a 3,100.

Para el desarrollo de la prueba de T de student nos ayudamos del software SPSS.

Figura 75

Estadísticas para una muestra de la prueba T de student

Estadísticas para una muestra				
	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Ratio	120	3598,6155	178,89479	16,33079

Fuente: Elaboración propia.

Figura 76

Prueba para una muestra de la prueba T - student

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 3100						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
Ratio	30,532	119	<.001	498,61548	466,2789	530,9521

Fuente: Elaboración propia.

De los datos obtenidos podemos afirmar que la significación estadística sig. (bilateral) es menor a 0.01, y al ser menor a 0.05, que es el nivel de significancia asumida, se rechaza la hipótesis nula.

Figura 77

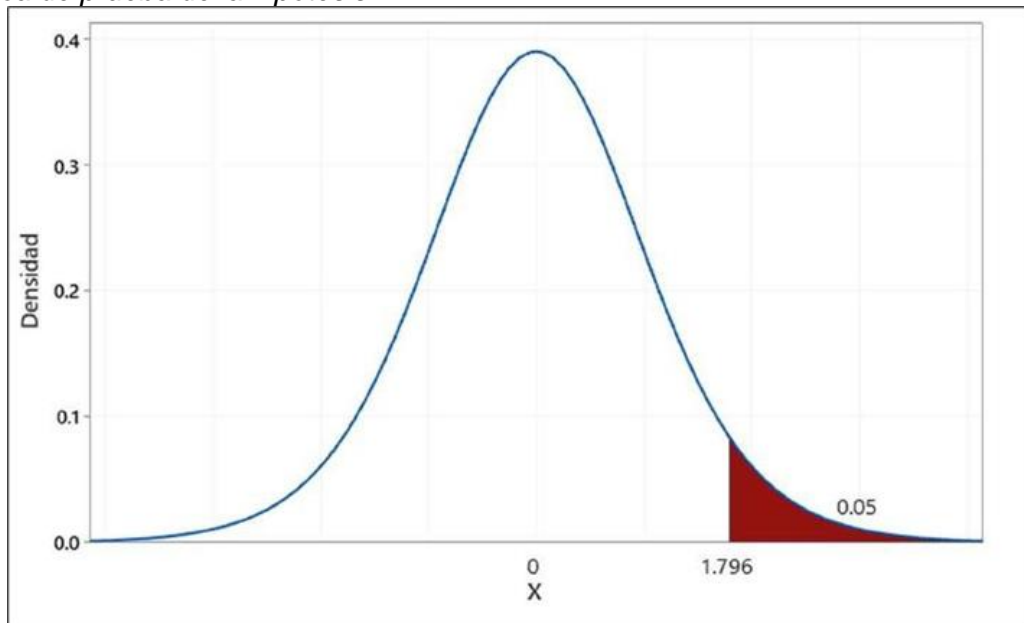
Valor de T estadístico de prueba

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 3,100$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu > 3,100$
Valor T	Valor p
30.532	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Figura 78

Gráfica de prueba de la hipótesis



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico podemos observar que el valor t observado (30.532) se encuentra muy alejado a la derecha del valor t crítico (1.658), ubicado dentro de la zona de rechazo para un nivel de significancia del 5 %.

En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula, lo cual permite afirmar, con sustento estadístico, que la implementación del software de simulación presenta una asociación

positiva y estadísticamente significativa con el incremento en la productividad diaria del tonelaje extraído. Este resultado evidencia una mejora en la eficiencia operativa del proceso extractivo, reflejándose en un aumento sostenido en los volúmenes de la producción total de mineral.

Conclusiones

La implementación del software Simprep, enfocado exclusivamente en la simulación de procesos operativos mineros, permitió mejorar significativamente los niveles de cumplimiento tanto en avances como en producción. Al generar escenarios realistas y predecibles, se facilitó una mejor toma de decisiones, logrando que el cumplimiento de avances pasara del 77% al 92% y el de producción de tajeos del 80% al 98%.

El uso de Simprep permitió identificar deficiencias operativas en tiempo simulado, lo que facilitó ajustes estratégicos en la utilización de equipos clave como jumbos frontoneros, taladros largos y equipos de acarreo. Esto mejoró su rendimiento incrementando la adherencia al plan minero y alineando mejor la ejecución con la planificación.

La capacidad de simular cuellos de botella y demoras permitió optimizar el ciclo de minado, reduciendo significativamente los tiempos improductivos tanto operativos como no operativos. Gracias a estas mejoras, se consiguió un avance más fluido en los frentes de trabajo, consolidando la eficiencia operacional.

A nivel económico, la simulación realizada con Simprep permitió evaluar previamente estrategias de operación que resultaron en una reducción del OPEX de 3.6 \$/ton, lo que representa un ahorro del 4% respecto al costo base de 90 \$/ton. Esta reducción evidencia el impacto positivo de una planificación basada en simulaciones para alcanzar una mayor rentabilidad.

Recomendaciones

Se recomienda consolidar el uso de Simprep como herramienta central de simulación en la planificación minera, debido a su capacidad para modelar de forma precisa los procesos operativos y anticipar desviaciones antes de que ocurran en la realidad. Esto facilitará decisiones más informadas y una mayor previsibilidad en la operación.

Para mantener los niveles de mejora alcanzados, es importante establecer rutinas de análisis con Simprep que permitan proyectar el uso óptimo de equipos de perforación, acarreo y taladros largos. Acompañar esta simulación con indicadores reales de rendimiento asegurará una mayor eficiencia técnica y operativa.

Se sugiere integrar Simprep a un sistema de retroalimentación diaria que utilice sus simulaciones para validar o corregir el desempeño real. Esto permitirá identificar cuellos de botella antes de que afecten la operación, reforzando el control de ciclos de minado y la continuidad operativa.

Finalmente, se recomienda extender el uso de Simprep a otras fases o unidades operativas del yacimiento, ya que su enfoque en la simulación de procesos permite adaptar soluciones según las condiciones de cada frente. Su contribución a la reducción del OPEX lo convierte en una herramienta estratégica para mejorar la sostenibilidad de la operación minera.

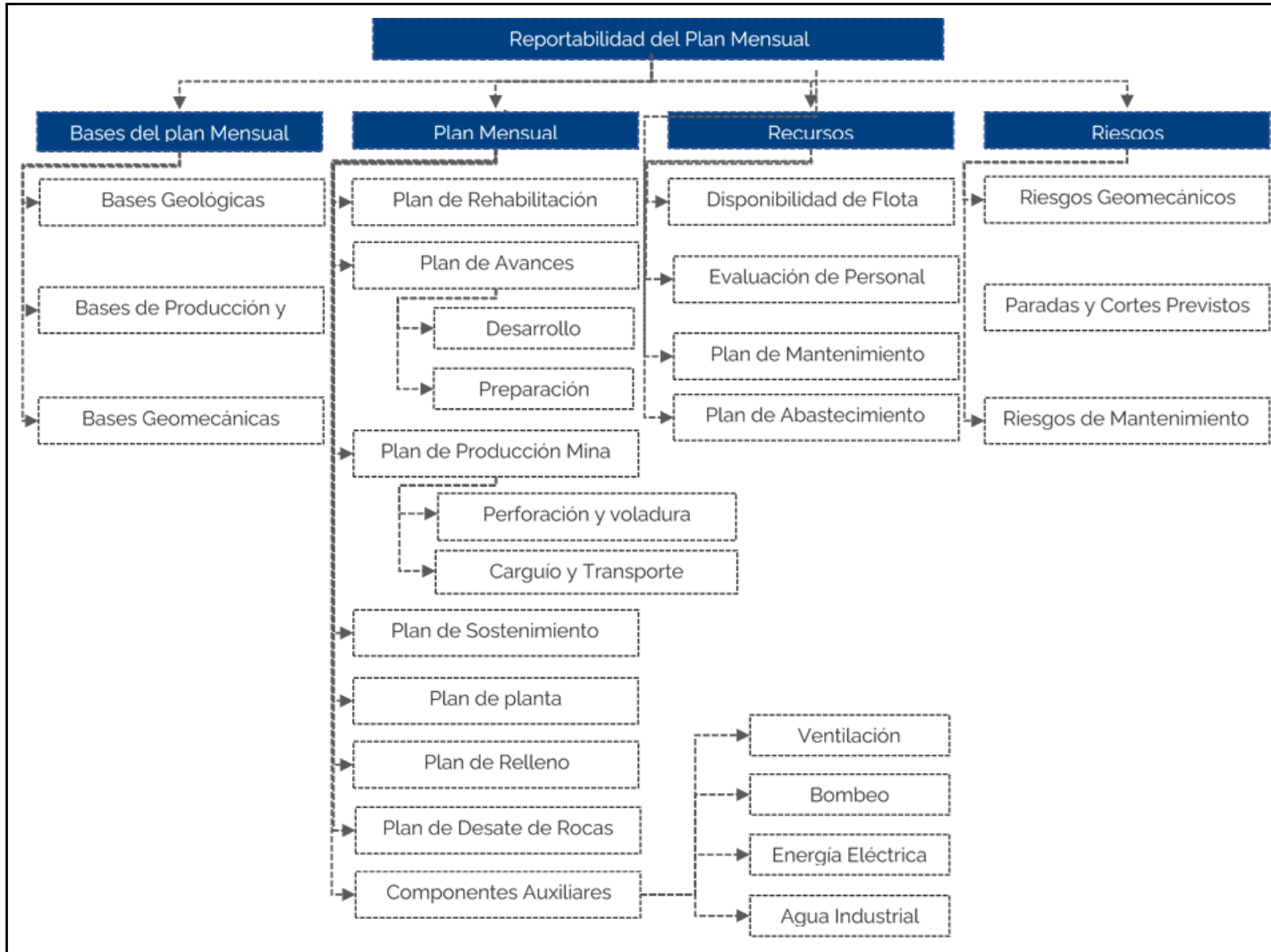
Referencias bibliográficas

- Garrido E. (2017) *Simulación de nivel de producción Proyecto Nuevo Nivel Mina - Codelco Chile.*
- Gonzales J. (2012) *La hoja de cálculo como herramienta para la toma de decisiones: Elaboración de Cuadros de Mando, Dashboard y KPI's.*
- Huaynate H. (2018) *Aplicación de mejora continua en la gestión del planeamiento operativo minero y su influencia en el beneficio económico mina Untuca – Cori Puno S.A.C.*
- Izar J. (2004) *Las 7 herramientas básicas de la calidad: Descripción de las 7 herramientas estadísticas para mejorar la calidad y aumentar la productividad.*
- MINSUR S.A. (2023) *Plan Anual de minado 2023. Puno – Perú.*
- Pesantes L. (2023) *Evaluación de los tiempos de perforación y su relación con la productividad de un equipo de perforación tipo jumbo.*
- Quispe L. (2022) *Mejora de la adherencia del plan de producción mina empleando metodología de planificación con herramientas computacionales.*
- Ramírez N. (2008) *Sistema de gestión del tiempo en operaciones mineras.*
- Solano C. (2022) *Mejoramiento de la productividad de camiones mineros en base a la reducción de sus demoras operativas.*
- Valentín C. (2018) *Control y mejora de la productividad del acarreo y transporte de mineral desde las labores de profundización hacia la superficie en la Unidad de producción San Cristóbal – Volcan Compañía Minera S.A.A.*
- Vega M. (2021). *Análisis de las demoras para mejorar la productividad de equipos de bajo perfil en empresas mineras de extracción de oro.*

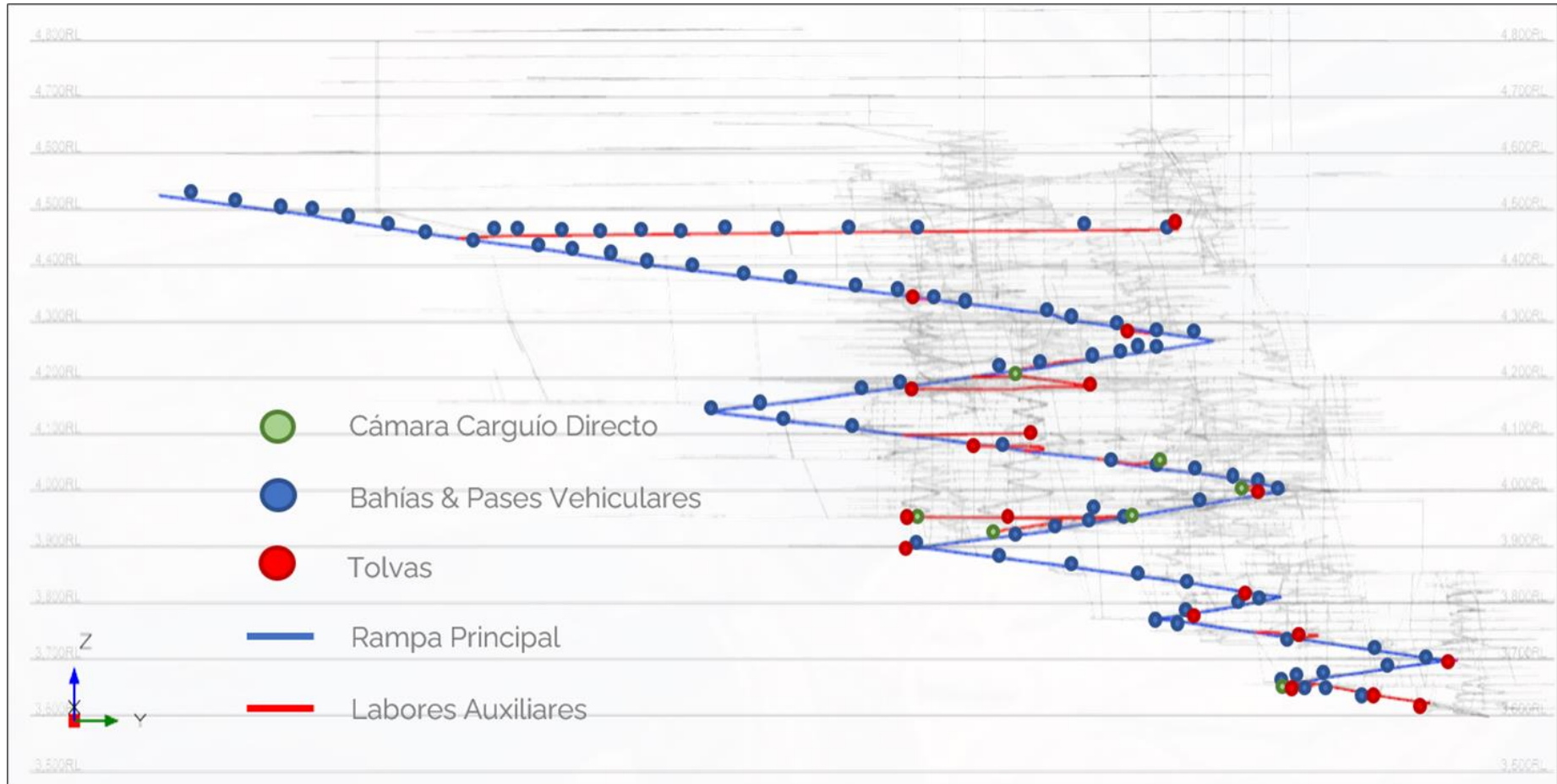
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Reportabilidad del plan mensual	1
Anexo 2: Vista longitudinal de interior mina	2
Anexo 3: Vista en planta de la programación de avances	3
Anexo 4: Vista longitudinal de los programas de paneles (producción).....	4
Anexo 5: Definición del Plan LOM Base.....	5

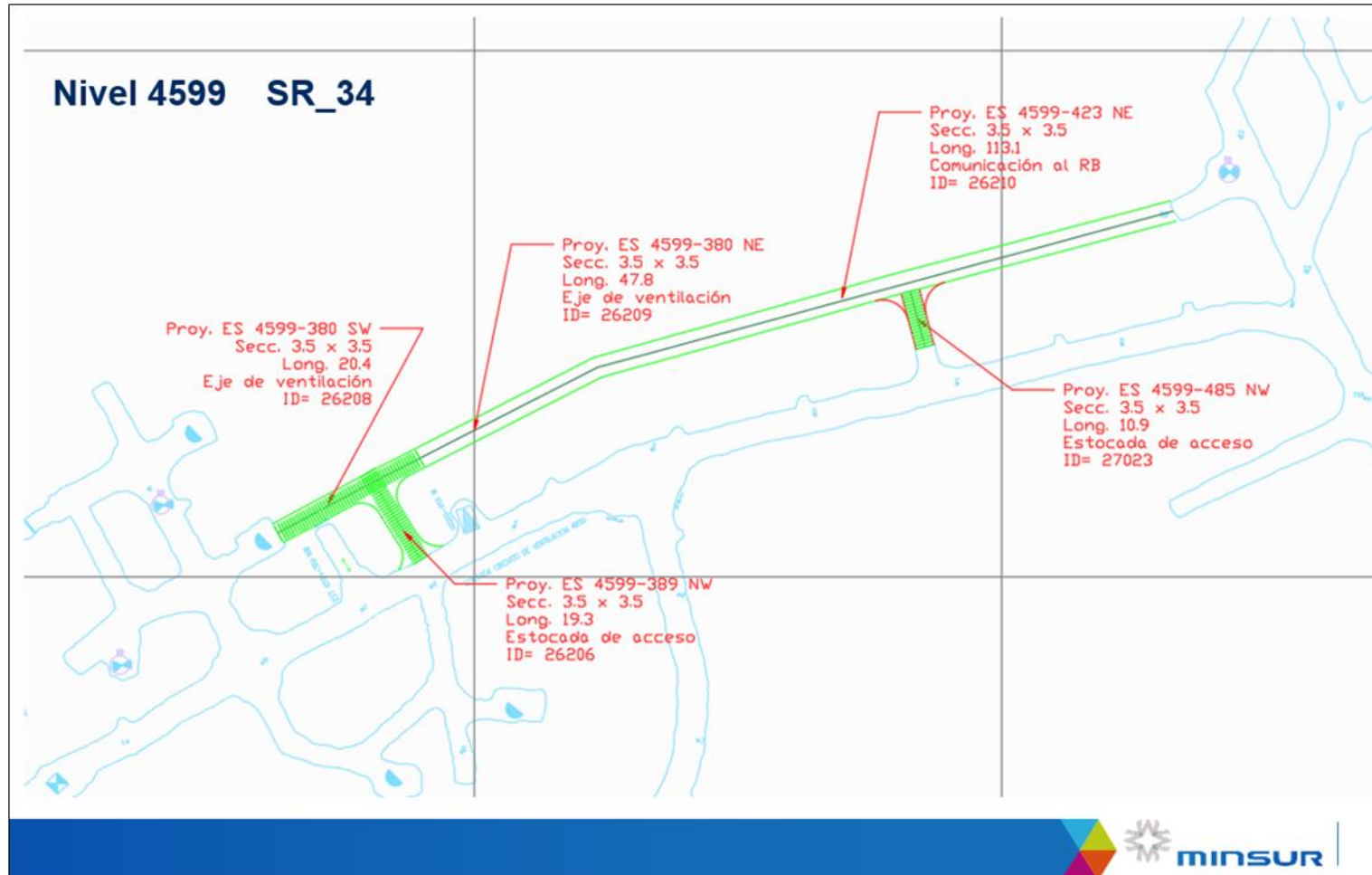
Anexo 1: Reportabilidad del plan mensual



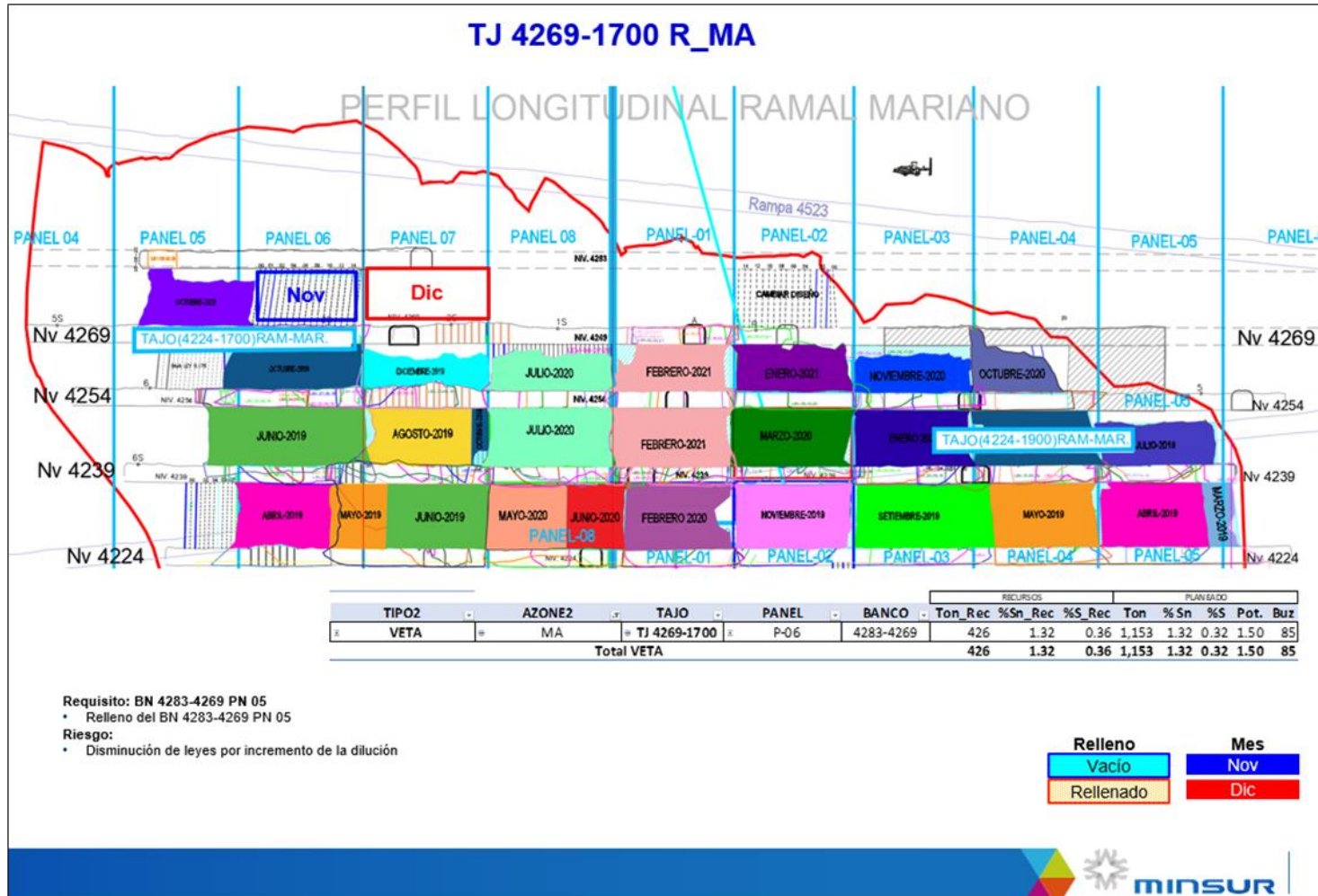
Anexo 2: Vista longitudinal de interior mina



Anexo 3: Vista en planta de la programación de avances



Anexo 4: Vista longitudinal de los programas de paneles (producción)



Anexo 5: Definición del Plan LOM Base

