



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Mejoras en la voladura de rocas para optimizar la sobreexcavación y
aumentar la productividad en unidad minera Magistral**

Tesis presentada por:

Taya Apaza, Raul Stefano

ORCID: 0009-0004-9096-0239

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Maestro. Barreda de la Cruz, Miguel Alberto

ORCID: 0000-0002-9329-4460

Arequipa - Perú

2026

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA DE MINAS**

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 19 de Mayo del 2026

Dictamen: 018386-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 018386, presentado por:

2017802901 - TAYA APAZA RAUL STEFANO

Titulado:

**MEJORAS EN LA VOLADURA DE ROCAS PARA OPTIMIZAR LA SOBREECAVACIÓN Y
AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN UNIDAD MINERA MAGISTRAL**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR**



Mejoras en la voladura de rocas para optimizar la sobreexcavación y aumentar la productividad en unidad minera Magistral

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	12%	0%	15%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

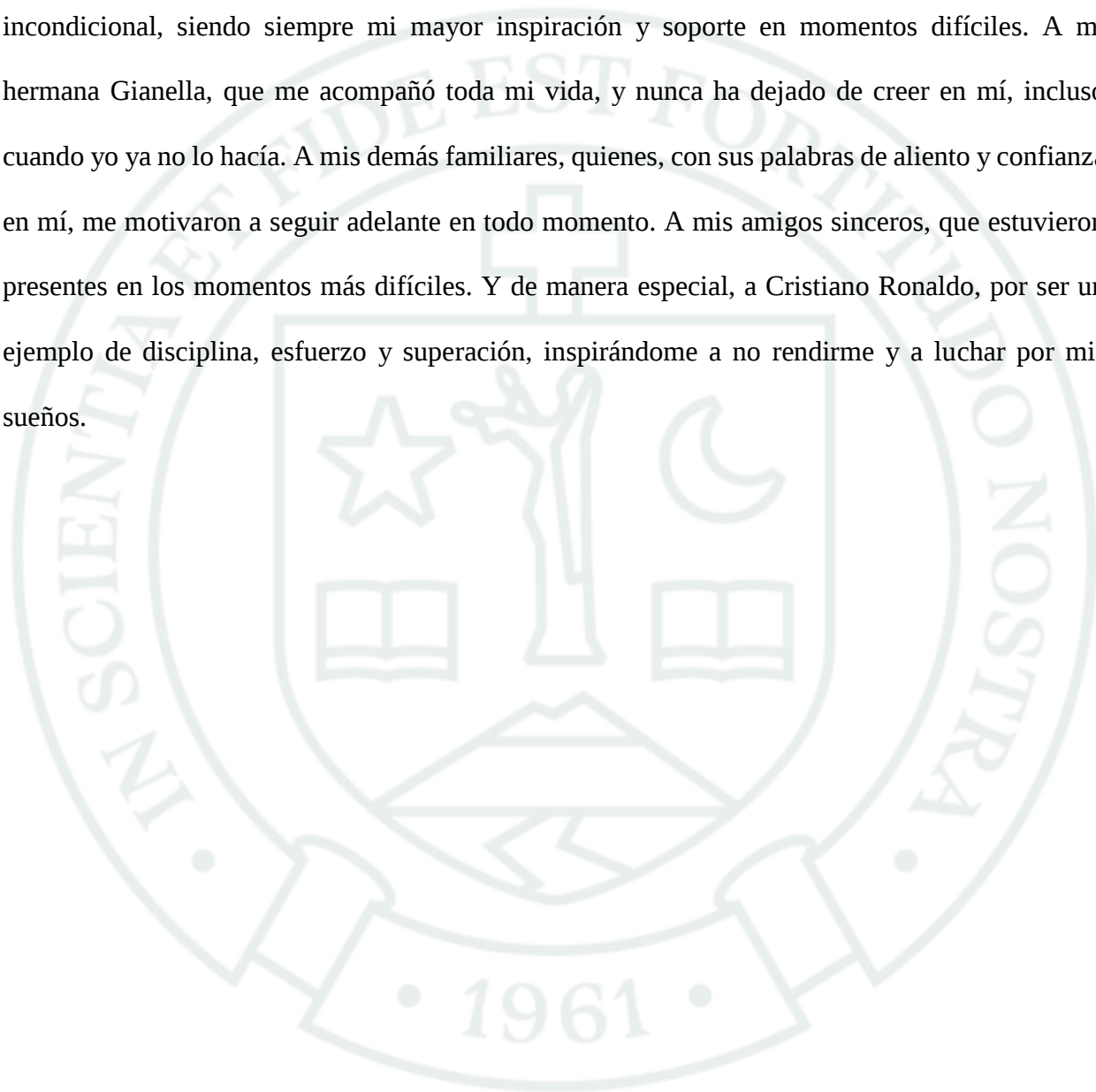
FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	8%
	Trabajo del estudiante	
2	Submitted to Universidad Nacional de Moquegua	5%
	Trabajo del estudiante	
3	repositorio.ucsm.edu.pe	4%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.unc.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.unsch.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas Apagado Excluir coincidencias < 1%
Excluir bibliografía Apagado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por guiar mis pasos y darme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta. A mis padres Estela y Apolinar, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional, siendo siempre mi mayor inspiración y soporte en momentos difíciles. A mi hermana Gianella, que me acompañó toda mi vida, y nunca ha dejado de creer en mí, incluso cuando yo ya no lo hacía. A mis demás familiares, quienes, con sus palabras de aliento y confianza en mí, me motivaron a seguir adelante en todo momento. A mis amigos sinceros, que estuvieron presentes en los momentos más difíciles. Y de manera especial, a Cristiano Ronaldo, por ser un ejemplo de disciplina, esfuerzo y superación, inspirándome a no rendirme y a luchar por mis sueños.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por brindarme la vida, la salud y la sabiduría para culminar esta etapa. A mis padres y familiares, por su apoyo constante, comprensión y confianza a lo largo de todo este proceso académico. A mis docentes, por compartir sus conocimientos, orientación y dedicación en mi formación profesional. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron o estuvieron en mi proceso para la realización de este trabajo.



RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de las mejoras en la voladura de rocas para optimizar la sobreexcavación y aumentar la productividad en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral durante el año 2025. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, comparando dos periodos: el segundo trimestre sin mejora y el tercer trimestre con la implementación de una malla optimizada de perforación y voladura, basada en los modelos de Holmberg-Persson para el diseño de contorno y Kuz-Ram para la estimación de la fragmentación, validada mediante el software Split Desktop.

Los resultados evidenciaron mejoras significativas en los indicadores operativos. La producción (TPD) se incrementó de 194.65 a 231.20 TPD, representando un aumento del 18.77 %, mientras que el avance por disparo pasó de 1.30 a 1.61 m/disparo, equivalente a una mejora del 24 %. Asimismo, la fragmentación (P80) se redujo de 9.76 a 7.97 pulgadas, logrando una mejora del 18.38 %, y el porcentaje de sobreexcavación disminuyó de 29.01 % a 16.07 %, representando una reducción del 44.60 %. Estos resultados demostraron que la optimización del diseño de voladura permitió mejorar la eficiencia del proceso de minado y el control del contorno de la excavación.

En conclusión, la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura influyó positivamente en la productividad, la calidad de fragmentación y la reducción de la sobreexcavación, validando el cumplimiento de los objetivos planteados y demostrando la efectividad de la aplicación de herramientas técnicas en la optimización de procesos en minería subterránea.

Palabras clave: voladura optimizada, fragmentación, sobreexcavación.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the influence of improvements in rock blasting to optimize overbreak and increase productivity in the Gallery +30 Level 3 of the Magistral Mining Unit during 2025. The study followed a quantitative approach, comparing two operational periods: the second quarter without improvement and the third quarter with the implementation of an optimized drilling and blasting pattern, based on the Holmberg-Persson model for contour design and the Kuz-Ram model for fragmentation prediction, validated using Split Desktop software.

The results showed significant improvements in operational indicators. Production (TPD) increased from 194.65 to 231.20 TPD, representing an improvement of 18.77%, while the advance per blast increased from 1.30 to 1.61 m/blast, equivalent to a 24% increase. Additionally, fragmentation (P80) decreased from 9.76 to 7.97 inches, achieving an improvement of 18.38%, and the overbreak percentage was reduced from 29.01% to 16.07%, representing a 44.60% reduction. These results demonstrated that the optimization of the blasting design improved the efficiency of the mining cycle and enhanced the control of excavation geometry.

In conclusion, the implementation of the optimized drilling and blasting design had a positive impact on productivity, fragmentation quality, and overbreak reduction, validating the research objectives and demonstrating the effectiveness of applying technical models and tools for process optimization in underground mining.

Keywords: Optimized blasting, fragmentation, overbreak.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO I 3

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.1 Planteamiento del Problema..... 3

1.2 Preguntas de Investigación 6

1.2.1 Pregunta General 6

1.2.2. Problemas Específicos 6

1.3 Objetivos 6

1.3.1 Objetivo General 6

1.3.2 Objetivos Específicos 6

1.4 Línea de Investigación 7

1.5 Solución Propuesta..... 8

1.5.1 Justificación e Importancia..... 8

CAPÍTULO II 11

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 11

2.1.	Estado del arte.....	11
2.1.1.	Antecedentes Locales	11
2.1.2.	Antecedentes Nacionales	12
2.1.3.	Antecedentes Internacionales	14
2.2.	Bases Teóricas de la Investigación.....	16
2.2.1.	Diseño de perforación y voladura en minería subterránea.....	16
2.2.2.	Modelo de Holmberg-Persson para voladuras subterráneas.....	16
2.2.3.	Modelo Kuz-Ram para la predicción de la fragmentación	17
2.2.4.	Análisis de fragmentación mediante Split Desktop	17
2.2.5.	Control de la sobreexcavación en minería subterránea.....	17
2.3.	Definiciones	18
2.3.1.	Voladura de Rocas	18
2.3.2.	Perforación minera	18
2.3.3.	Fragmentación del macizo rocoso.....	18
2.3.4.	Burden	19
2.3.5.	Espaciamiento	19
2.3.6.	Factor de carga	19
2.3.7.	Sobreexcavación	19
2.3.8.	Productividad minera	20
2.3.9.	Modelo Holmberg Persson.....	20

2.3.10.	Modelo Kuz-Ram	20
2.3.11.	P80	20
2.3.12.	RMR (Rock Mass Rating)	21
2.3.13.	JKSimBlast	21
2.3.14.	Split Desktop	21
2.3.15.	Macizo Rocoso	21
CAPITULO III.....		22
3.	MARCO METODOLÓGICO	22
3.1.	Alcances y Limitaciones	22
3.1.1.	Alcances	22
3.1.2.	Limitaciones	23
3.2.	Tipo y Nivel de Investigación.....	23
3.2.1.	Tipo de Investigación	23
3.2.2.	Nivel de Investigación.....	24
3.3.	Hipótesis de Investigación.....	24
3.3.1.	Hipótesis General	24
3.3.2.	Hipótesis específicas	24
3.4.	Variables	25
3.4.1.	Variable Independiente	25
3.4.2.	Variable Dependiente.....	25

3.4.3. Operacionalización de Variables.....	27
3.5. Población y Muestra o Universo.....	29
3.5.1. Población.....	29
3.5.2. Muestra.....	29
3.6. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	29
3.6.1. Método de la Investigación	29
3.6.2. Técnicas de Recolección de Datos.....	30
3.6.3. Instrumentos de Recolección de Datos.....	30
3.7. Plan de Análisis de los Datos	31
3.7.1. Técnicas de Análisis de Datos.....	31
3.8. Procedimiento de la Investigación	31
CAPITULO IV	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	33
4.1. Malla de perforación	35
4.2. Aplicación de fórmulas de Holmberg-Persson para el tercer trimestre	37
4.2.1. Cálculo del espaciamiento teórico	37
4.2.2. Cálculo del burden teórico	38
4.2.3. Cálculo del burden práctico	39
4.2.4. Cálculo de la carga lineal mínima para smooth blasting.....	40
4.2.5. Aplicación del modelo Kuz-Ram para el tercer trimestre.....	41

4.2.6. Volumen de roca por taladro.....	42
4.2.7. Carga explosiva por taladro	42
4.2.8. Tamaño medio de fragmentación según Kuznetsov modificado	43
4.2.9. Cálculo del índice de uniformidad	44
4.3. Simulación JKSImblast antes de la mejora	46
4.4. Diseño de carga en galería después de la mejora.....	50
4.5. Resultados por objetivos	54
4.5.1. Resultados objetivo general	54
4.5.2. Resultados objetivo específico 1.....	55
4.5.3. Resultados objetivo específico 2.....	55
4.5.4. Resultados objetivo específico 3.....	55
4.6. Resultados	78
4.7. Análisis.....	81
4.8. Discusiones	82
4.9. Contrastación de Hipótesis.....	84
4.9.1. Contrastación de la hipótesis general	85
4.9.2. Contrastación de la hipótesis específica 1.....	85
4.9.3. Contrastación de la hipótesis específica 2.....	86
4.9.4. Contrastación de la hipótesis específica 3.....	86
CONCLUSIONES.....	89

RECOMENDACIONES.....	91
----------------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
---------------------------------	----



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	27
Tabla 2. Estadísticos descriptivos antes y después de la optimización del factor de carga	36
Tabla 3. Carga por taladro.....	53
Tabla 4. Parámetros tercer trimestre	53
Tabla 5. Parámetros abril 2025	56
Tabla 6. Parámetros de mayo 2025.....	58
Tabla 7. Parámetros de junio 2025.....	60
Tabla 8. Parámetros de julio del 2025.....	62
Tabla 9. Parámetros de agosto del 2025	64
Tabla 10. Parámetros de septiembre del 2025	66
Tabla 11. Comparativo de resultados: Segundo vs Tercer trimestre	80
Tabla 12. Contrastación de hipótesis	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Malla perforación antes de la mejora en la Galería +30 del Nivel 3.....	35
Figura 2. Malla de perforación	46
Figura 3. Primado de taladros	46
Figura 4. Carguío de taladros.....	47
Figura 5. Taco de carga.....	47
Figura 6. Amarre de taladros	48
Figura 7. Detonación de salida	48
Figura 8. Curvas de energía	49
Figura 9. Campo de energía.....	49
Figura 10. Malla después de la mejora	50
Figura 11. Distribución de carga.....	52
Figura 12. Producción mensual	68
Figura 13. Producción trimestral	69
Figura 14. Avance por disparo mensual	70
Figura 15. Avance por disparo trimestral	71
Figura 16. Fragmentación mensual.....	72
Figura 17. Fragmentación trimestral.....	73
Figura 18. Factor de carga mensual	74
Figura 19. Factor de carga trimestral	75
Figura 20. Costo unitario de producción mensual	76
Figura 21. Sobreexcavación trimestral	77

INTRODUCCIÓN

En la minería subterránea, el proceso de perforación y voladura constituye una de las etapas más críticas del ciclo de minado, ya que influye directamente en la fragmentación del macizo rocoso, el avance de las labores y la estabilidad de la excavación. Una voladura inadecuadamente diseñada puede generar problemas como fragmentación gruesa, elevada sobreexcavación y baja eficiencia en el avance, lo que repercute negativamente en la productividad y en los costos operativos. En ese contexto, la optimización de los parámetros de diseño de voladura se presenta como una alternativa clave para mejorar el desempeño técnico y económico de las operaciones mineras.

La presente investigación se desarrolló en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, considerando condiciones geomecánicas de RMR 55 % tipo IIB, una sección de 2.10 m × 2.40 m y el uso de equipos de perforación tipo Jack Leg con broca de 38 mm. El estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia de las mejoras en la voladura de rocas para optimizar la sobreexcavación y aumentar la productividad, mediante la comparación de dos periodos operativos del año 2025: el segundo trimestre (sin mejora) y el tercer trimestre (con implementación de una malla optimizada de perforación y voladura).

Para el desarrollo de la investigación se emplearon herramientas técnicas y modelos matemáticos reconocidos en el ámbito de la voladura. El diseño de la malla se realizó mediante el modelo de Holmberg-Persson, orientado al control del contorno y reducción de la sobreexcavación, mientras que la estimación de la fragmentación se efectuó mediante el modelo Kuz-Ram, cuyos resultados fueron validados en campo utilizando el software Split Desktop. Asimismo, se utilizó el software JKSimBlast para la simulación y ajuste de los parámetros de voladura, permitiendo optimizar la distribución de la energía explosiva en el

macizo rocoso.

Los resultados obtenidos evidenciaron mejoras significativas en los indicadores operativos, tales como el incremento de la producción y del avance por disparo, la reducción del tamaño de fragmentación y la disminución del porcentaje de sobreexcavación. Estas mejoras demostraron que la aplicación de un diseño técnico adecuado de voladura permite optimizar el rendimiento del proceso de minado y mejorar la eficiencia operativa en minería subterránea.

En este sentido, la investigación aporta evidencia técnica sobre la importancia de aplicar modelos de diseño y herramientas de simulación en la optimización de la voladura de rocas, contribuyendo al desarrollo de metodologías que permitan mejorar la productividad y el control del macizo rocoso en labores subterráneas. Asimismo, los resultados obtenidos pueden ser replicados en operaciones con condiciones similares, fortaleciendo la mejora continua en los procesos de explotación minera.

CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

La perforación y voladura constituye una de las etapas más importantes del ciclo de minado en la minería subterránea, debido a que define la calidad de la fragmentación del macizo rocoso y condiciona el desempeño de las operaciones posteriores de carguío, transporte y sostenimiento. Un diseño de voladura inadecuado puede generar fragmentación irregular, exceso de vibraciones, dilución y sobreexcavaciones en las labores mineras, lo cual repercute directamente en la estabilidad del macizo rocoso y en los costos operativos de la explotación. Por esta razón, la optimización de los parámetros de voladura se ha convertido en una necesidad técnica dentro de las operaciones subterráneas modernas, donde se busca lograr avances controlados con mínima perturbación del entorno rocoso (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Cunningham, 1987).

En el contexto de la minería subterránea mecanizada y convencional, el control de la sobreexcavación representa uno de los principales retos del diseño de voladuras. La sobreexcavación ocurre cuando el volumen excavado supera las dimensiones del diseño de la labor minera, generando mayor dilución del mineral, incremento en los costos de sostenimiento y mayores requerimientos de relleno o fortificación. Diversos estudios han demostrado que la sobreexcavación se encuentra asociada principalmente a parámetros de diseño de voladura como el burden, espaciamiento, factor de carga, distribución del explosivo y secuencia de detonación, los cuales deben adaptarse a las características geomecánicas del macizo rocoso (Hoek & Brown, 2019; Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

En la Unidad Minera Magistral, específicamente en la Galería +30 del Nivel 3, se

desarrolla el avance de labores con una sección aproximada de 2.10 m por 2.40 m, empleando equipos de perforación Jack Leg, barras de 6 pies de longitud y brocas de 38 mm de diámetro, bajo condiciones geomecánicas caracterizadas por un macizo rocoso con RMR promedio de 55%, clasificado como tipo IIB. En estas condiciones operativas se realiza aproximadamente una voladura diaria, alcanzando avances cercanos a 56 metros por día (mpd) en las labores de desarrollo. Sin embargo, durante el proceso de avance se han identificado problemas asociados a la presencia de sobreexcavaciones, fragmentación irregular del material volado y variaciones en la eficiencia del ciclo de minado, lo cual afecta la productividad general de la operación (Hoek, 2007; Brady & Brown, 2006).

Estas desviaciones operativas se encuentran relacionadas principalmente con el diseño tradicional de malla de perforación utilizado en las labores, el cual no considera de manera sistemática modelos matemáticos de predicción de fragmentación ni herramientas de simulación de voladuras que permitan optimizar la distribución de energía explosiva en el macizo rocoso. La ausencia de herramientas de análisis como JKSimBlast, Split Desktop y modelos predictivos como Holmberg-Persson y Kuz-Ram limita la capacidad de predecir el comportamiento de la voladura y controlar el tamaño de fragmentación del material, especialmente el parámetro P80, que representa el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80% del material fragmentado (Cunningham, 1983; Persson et al., 1994).

Durante el primer periodo de evaluación correspondiente a los meses de abril, mayo y junio del año 2025, las labores de avance se realizaron sin la implementación de mejoras en el diseño de voladura, manteniendo los parámetros tradicionales de perforación y carga explosiva. En este periodo se observaron efectos asociados a la presencia de sobreexcavación en los contornos de la galería, fragmentación heterogénea del material volado y variabilidad

en los avances obtenidos por disparo, lo que evidenció la necesidad de optimizar los parámetros de diseño de voladura en función de las características geomecánicas del macizo rocoso y de las condiciones operativas de la labor (Jimeno et al., 1995; Konya & Walter, 1990).

Frente a esta problemática, surge la necesidad de implementar mejoras en el diseño de voladura mediante el uso de herramientas de simulación y modelos de predicción que permitan optimizar la distribución de los taladros, el burden, el espaciamiento y la carga explosiva, con el objetivo de controlar la sobreexcavación y mejorar la calidad de la fragmentación del macizo rocoso. En este contexto, el uso del software JKSimBlast permite simular diferentes escenarios de diseño de voladura antes de su aplicación en campo, mientras que el modelo Holmberg-Persson facilita la estimación de los parámetros de perforación en minería subterránea y el modelo Kuz-Ram permite predecir la distribución de tamaños de fragmentación del material volado, información que posteriormente puede ser validada mediante el análisis digital de imágenes utilizando el software Split Desktop (Cunningham, 1987; Persson et al., 1994).

En ese sentido, la investigación plantea evaluar la aplicación de mejoras en el diseño de voladura durante el segundo periodo de análisis correspondiente a los meses de julio, agosto y septiembre del año 2025, con el propósito de optimizar el control de la sobreexcavación y mejorar la productividad de las labores de avance en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. La comparación entre ambos periodos permitirá analizar el efecto de la optimización de los parámetros de voladura sobre indicadores operativos como la fragmentación del material volado, el control geométrico de la sección de la labor y el avance efectivo por disparo diario (Persson et al., 1994; Hoek & Brown, 2019).

1.2 Preguntas de Investigación

1.2.1 Pregunta General

- ¿De qué manera las mejoras en la voladura de rocas influyen en la optimización de la sobreexcavación y en el incremento de la productividad en la Galería +30 del Nivel 3 en una mina subterránea tipo A durante el año 2025?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera la optimización del diseño de la malla de perforación mediante el modelo de Holmberg-Persson influye en el control de la sobreexcavación en la Galería +30 del Nivel 3 durante el año 2025?
- ¿Cómo influye la mejora del diseño de voladura en la fragmentación del macizo rocoso evaluada mediante el tamaño P80 utilizando el modelo Kuz-Ram y el software Split Desktop?
- ¿De qué manera la optimización del diseño de voladura impacta en la productividad del avance diario de la labor minera en la Unidad Minera Magistral?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar la influencia de las mejoras en la voladura de rocas para optimizar la sobreexcavación y aumentar la productividad en la Galería +30 del Nivel 3 en la Unidad Minera Magistral durante el año 2025.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la influencia de la optimización del diseño de la malla de perforación mediante el modelo de Holmberg-Persson en el control de la sobreexcavación en la

Galería +30 del Nivel 3.

- Analizar la mejora de la fragmentación del macizo rocoso mediante la predicción del tamaño P80 utilizando el modelo Kuz-Ram y su validación con el software Split Desktop.
- Evaluar el efecto de la optimización del diseño de voladura en la productividad del avance diario de la labor minera en la Unidad Minera Magistral.

1.4 Línea de Investigación

La presente investigación se enmarca en la línea de Optimización de Procesos Mineros, debido a que se orienta al mejoramiento del proceso de perforación y voladura en labores de desarrollo de minería subterránea. El estudio se desarrolla en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, donde se analiza la optimización del diseño de voladura con el propósito de controlar la sobreexcavación y mejorar la productividad del avance en labores con sección de 2.10 m por 2.40 m, bajo condiciones geomecánicas de RMR 55% tipo IIB. Para ello se emplean herramientas de simulación y análisis como JKSImBlast, el modelo de Holmberg-Persson para el diseño de voladuras subterráneas, el modelo Kuz-Ram para la estimación de la fragmentación y el software Split Desktop para la medición granulométrica del material volado. El estudio compara el segundo trimestre de 2025 (abril, mayo y junio) sin mejora y el tercer trimestre (julio, agosto y septiembre) con la implementación de mejoras, con el objetivo de optimizar parámetros de diseño como burden, espaciamiento y factor de carga, buscando un uso más eficiente de la energía explosiva, un mejor control del contorno de excavación y una mayor eficiencia operativa en el proceso de avance de la mina subterránea (Hustrulid & Bullock, 2001; Persson, Holmberg & Lee, 1994).

1.5 Solución Propuesta

1.5.1 Justificación e Importancia

Justificación técnica: Desde el punto de vista técnico, la investigación busca optimizar el diseño de perforación y voladura en labores de desarrollo subterráneo mediante la aplicación de herramientas de simulación y modelos matemáticos que permiten mejorar la distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso. El uso del software JKSimBlast, el modelo de Holmberg-Persson para diseño de voladuras subterráneas y el modelo Kuz-Ram para la estimación de la fragmentación permite analizar y ajustar parámetros como burden, espaciamiento, factor de carga y longitud de taladro, con el propósito de obtener una fragmentación más uniforme y un mejor control del contorno de excavación. Estas herramientas contribuyen a mejorar la eficiencia del proceso de voladura y a reducir desviaciones geométricas en las labores mineras (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Cunningham, 1987).

Justificación metodológica: La investigación adopta un enfoque cuantitativo basado en la comparación de dos periodos operativos durante el año 2025, considerando el segundo trimestre sin implementación de mejoras y el tercer trimestre con la optimización del diseño de voladura. Este enfoque permite evaluar de manera objetiva el efecto de las mejoras aplicadas en indicadores operativos como la fragmentación del material volado, la sobreexcavación y el avance por disparo. Asimismo, la utilización de herramientas de análisis digital de fragmentación mediante Split Desktop permite obtener mediciones más precisas del tamaño de partícula del material volado, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos en la investigación (Hustrulid & Bullock, 2001; Split Engineering, 2023).

Justificación operacional: En el ámbito operacional, la investigación contribuye a

mejorar el rendimiento del ciclo de minado en labores de desarrollo subterráneo, específicamente en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. La optimización del diseño de voladura permite mejorar el control del contorno de la excavación y obtener fragmentaciones más adecuadas para las operaciones de carguío y transporte, reduciendo tiempos improductivos asociados a fragmentación excesiva o a la necesidad de realizar voladuras secundarias. De esta manera, la mejora del proceso de voladura contribuye a incrementar la eficiencia operativa de las labores de desarrollo (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995; Konya & Walter, 1990).

Justificación económica: Desde el punto de vista económico, el control de la sobreexcavación y la optimización del diseño de voladura permiten reducir costos asociados al ciclo de minado. La sobreexcavación genera mayores requerimientos de sostenimiento, incremento en el consumo de explosivos y aumento en los costos de transporte y procesamiento de material diluido. Al mejorar el diseño de voladura y controlar los contornos de excavación, es posible reducir estos costos operativos y mejorar la rentabilidad de las operaciones mineras. La optimización de los parámetros de voladura constituye por tanto una estrategia importante para mejorar la eficiencia económica de las operaciones subterráneas (Hoek & Brown, 2019; Brady & Brown, 2006).

Justificación social: La mejora de los procesos productivos en minería también tiene implicancias sociales importantes, ya que contribuye a fortalecer la sostenibilidad de las operaciones mineras y a garantizar la continuidad de las actividades productivas que generan empleo y desarrollo en las zonas de influencia de las unidades mineras. La optimización de los procesos de perforación y voladura permite desarrollar operaciones más eficientes y responsables, promoviendo una mejor gestión de los recursos naturales y un uso más racional

de los explosivos dentro del proceso productivo (Hustrulid & Bullock, 2001).

Justificación en seguridad: Finalmente, desde el punto de vista de la seguridad minera, el control adecuado del diseño de voladura contribuye a reducir riesgos asociados a la inestabilidad del macizo rocoso y a la generación de fragmentación inadecuada. Un diseño de voladura optimizado permite mantener el control del contorno de excavación y evitar daños excesivos en el macizo rocoso circundante, lo que contribuye a mejorar la estabilidad de las labores subterráneas y a reducir la probabilidad de desprendimientos de roca. De esta manera, la aplicación de técnicas adecuadas de diseño de voladura constituye una herramienta fundamental para mejorar las condiciones de seguridad en las operaciones mineras subterráneas (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Hoek & Brown, 2019).

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del arte

2.1.1. *Antecedentes Locales*

Según Huerta (2023), en su tesis “Implementación del método de explotación corte y relleno ascendente para la extracción de reservas minerales del tajo 328 Cía. Minera Magistral de Huaraz S.A.C.”, en la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú. La tesis propone implementar el método de explotación corte y relleno ascendente en la Unidad Minera Magistral de Huaraz, evaluando su impacto en la producción y eficiencia operativa. Mediante un diseño descriptivo aplicado y análisis comparativo de producción entre niveles, se determinó que este método incrementó la producción de 18 100 t a 25 688 t (41.92%), resaltando la importancia de adecuar métodos de extracción a condiciones geomecánicas locales y propiedades del macizo rocoso; estos resultados aportan evidencia de que la optimización técnica en labores subterráneas puede traducirse en mejoras productivas y económicas.

Según Orbezo (2024), en su tesis “Modelo de malla en perforación y voladura en la optimización de la fragmentación del avance en By Pass 140 – Nivel 7 Unidad Minera S.R.M.L. Magistral de Huaraz”, en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú. Este estudio propone un modelo de malla de perforación y voladura para optimizar fragmentación en labores de desarrollo, aplicando análisis técnico de parámetros operativos y diseñando nuevos patrones de perforación. A través de análisis cuantitativos, evaluó cómo parámetros de carga y espaciamiento influyen en el tamaño de fragmentos y avance por

disparo, aportando evidencia de que una malla correctamente diseñada reduce daño al macizo y mejora el rendimiento productivo, lo cual es directamente aplicable al análisis de control de sobreexcavación en la investigación.

Según Porta (2025), en su tesis “Aplicación de la mejora continua en la extracción minera de la U.E.A – S.M.R.L. Magistral de Huaraz S.A.C”, en la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Perú. La investigación evalúa la influencia de la aplicación de mejora continua en la extracción minera, destacando la reducción del factor de potencia en perforación y voladura, aumento de disponibilidad mecánica y mayor rendimiento de producción. El estudio evidencia que iniciativas de mejora técnica y gestión operativa inciden positivamente en indicadores de rendimiento, lo que respalda la importancia de integrar prácticas de optimización continua para alcanzar parámetros productivos superiores, contextualizando cómo mejoras técnicas pueden contribuir a tu enfoque sobre control de sobreexcavación y eficiencia de voladura.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Según Vega (2021), en su tesis “Optimización de la perforación y voladura en galerías subterráneas para mejorar el avance lineal”, en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú. El objetivo del estudio fue optimizar el proceso de perforación y voladura en frentes de avance subterráneo para incrementar el avance lineal de galerías mineras. La investigación utilizó una metodología aplicada con enfoque cuantitativo, mediante un diseño experimental comparativo que evaluó parámetros de voladura antes y después de implementar mejoras en la malla de perforación. La muestra estuvo constituida por los disparos realizados en galerías de sección aproximada de 3.5 m. Los resultados evidenciaron que la optimización de parámetros de diseño permitió mejorar el avance por

disparo y reducir la fragmentación excesiva, contribuyendo a mejorar el rendimiento de las operaciones de desarrollo. Se concluye que la correcta planificación del diseño de perforación y voladura influye directamente en la productividad del avance en minería subterránea. Este estudio aporta a la presente investigación al demostrar que el rediseño de la malla de perforación permite mejorar el rendimiento de las labores de avance y optimizar el proceso de voladura.

Según Acero (2021), en su tesis “Propuesta de una malla de perforación y voladura para labores de avance en minería subterránea. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. El objetivo de esta investigación fue diseñar una malla de perforación y voladura que permita mejorar el avance en labores subterráneas. La metodología utilizada fue cuantitativa aplicada, con un diseño experimental que evaluó diferentes configuraciones de malla de perforación. La muestra estuvo conformada por registros de voladuras ejecutadas en labores de avance subterráneo. Los resultados mostraron que la optimización del diseño de la malla permitió mejorar la fragmentación y reducir la sobre rotura en las paredes de la labor, alcanzando eficiencias superiores al 80 % en el avance por disparo. Se concluye que la correcta selección de parámetros de diseño en perforación y voladura permite mejorar el control del contorno de excavación y aumentar la eficiencia del ciclo de minado. Este antecedente aporta a la presente investigación evidencia de que la optimización de la malla de perforación permite controlar la sobreexcavación y mejorar el rendimiento del avance.

Según Hinostroza (2022), en su tesis “Voladura diferenciada para reducir la dilución en minería subterránea”, en la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. El objetivo del estudio fue analizar la aplicación de voladura diferenciada para reducir la dilución en operaciones de minería subterránea. La investigación utilizó una metodología aplicada con

enfoque cuantitativo y un diseño experimental, evaluando el comportamiento de la fragmentación antes y después de implementar un nuevo esquema de voladura. La muestra estuvo compuesta por voladuras ejecutadas en tajeos de una mina aurífera subterránea. Los resultados demostraron que la implementación de voladura diferenciada permitió reducir la dilución y mejorar la distribución del material fragmentado, lo que facilitó el proceso de carguío y transporte. Se concluye que el control de la energía explosiva es fundamental para mejorar la eficiencia del proceso de minado. Este antecedente aporta a la presente investigación evidencia de que el control técnico del proceso de voladura permite mejorar la fragmentación y reducir efectos negativos como dilución o sobreexcavación.

2.1.3. Antecedentes Internacionales

Según Ramos (2022), en su tesis “Optimización del diseño de perforación y tronadura en minería subterránea”, en la Universidad de Chile, Santiago, Chile. El objetivo del estudio fue evaluar el impacto del rediseño del proceso de perforación y tronadura en el rendimiento de operaciones subterráneas. La investigación utilizó una metodología cuantitativa aplicada, con un diseño experimental comparativo que evaluó diferentes configuraciones de malla de perforación. La muestra estuvo compuesta por registros de voladuras realizadas en operaciones subterráneas de minería metálica. Los resultados mostraron que la optimización del diseño permitió mejorar la fragmentación y reducir los costos operativos asociados al proceso de minado. Se concluye que el rediseño del proceso de tronadura contribuye a mejorar la eficiencia operativa y el control del macizo rocoso. Este estudio aporta a la presente investigación evidencia de que la optimización del diseño de voladura mejora el rendimiento operativo y reduce los efectos negativos en la excavación.

Según García (2021), en su tesis “Diseño de perforación y voladura para optimizar el avance en túneles mineros”, en la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. El objetivo de la investigación fue diseñar un esquema de perforación y voladura que permita mejorar el avance en excavaciones subterráneas. La metodología utilizada fue aplicada con enfoque cuantitativo, utilizando un diseño experimental para evaluar el comportamiento de diferentes patrones de perforación. La muestra estuvo conformada por registros de voladuras ejecutadas en túneles mineros. Los resultados evidenciaron que la optimización de parámetros de perforación permitió mejorar el avance y reducir el daño al macizo rocoso. Se concluye que la correcta planificación del diseño de voladura es clave para mejorar la eficiencia del proceso de excavación subterránea. Este antecedente demuestra que la optimización del diseño de perforación y voladura permite mejorar la productividad del avance.

Según López (2023), en su tesis “Optimización de la fragmentación en minería subterránea mediante modelos de voladura”, en la Universidad de Oviedo, Oviedo, España. El objetivo del estudio fue analizar la optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante la aplicación de modelos matemáticos de voladura. La investigación utilizó una metodología cuantitativa aplicada, con un diseño experimental, evaluando la fragmentación obtenida mediante diferentes configuraciones de voladura. La muestra estuvo compuesta por voladuras realizadas en labores de minería subterránea. Los resultados demostraron que la aplicación de modelos de predicción de fragmentación permitió mejorar el control del tamaño de partículas y optimizar el rendimiento del proceso de minado. Se concluye que la aplicación de herramientas de análisis y simulación permite mejorar significativamente el desempeño de las operaciones mineras. Esto evidencia de que el uso de modelos de predicción de fragmentación mejora el control del proceso de voladura y la eficiencia del avance.

2.2. Bases Teóricas de la Investigación

2.2.1. *Diseño de perforación y voladura en minería subterránea*

El diseño de perforación y voladura constituye una etapa fundamental dentro del ciclo de minado en minería subterránea, ya que determina la eficiencia del proceso de fragmentación del macizo rocoso y el rendimiento de las operaciones posteriores como carguío, transporte y sostenimiento. Un adecuado diseño de malla de perforación permite distribuir de manera eficiente la energía liberada por el explosivo, lo que facilita el desprendimiento controlado de la roca y evita daños excesivos en el macizo circundante. Para lograr un diseño óptimo se consideran parámetros como burden, espaciamiento, diámetro del taladro, longitud de perforación, tipo de explosivo y secuencia de detonación, los cuales deben ajustarse de acuerdo con las características geomecánicas del macizo rocoso y las dimensiones de la labor minera (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

2.2.2. *Modelo de Holmberg-Persson para voladuras subterráneas*

El modelo de Holmberg-Persson es uno de los métodos más utilizados para el diseño de voladuras en minería subterránea, ya que permite estimar parámetros de perforación adecuados para labores de desarrollo considerando las propiedades del macizo rocoso y las características del explosivo utilizado. Este modelo establece relaciones entre el diámetro del taladro, el burden, el espaciamiento y la carga explosiva, con el objetivo de optimizar la fragmentación y controlar el daño en el contorno de la excavación. La aplicación de este modelo permite mejorar la eficiencia del proceso de voladura y reducir problemas asociados a sobreexcavaciones o fragmentaciones inadecuadas en labores subterráneas (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

2.2.3. Modelo Kuz-Ram para la predicción de la fragmentación

El modelo Kuz-Ram es un modelo matemático ampliamente utilizado para predecir la distribución de tamaños de fragmentación del material volado. Este modelo combina la ecuación de Kuznetsov para estimar el tamaño medio de fragmentación con la ecuación de Rosin-Rammler para describir la distribución granulométrica del material fragmentado. A partir de parámetros como el tipo de roca, la carga explosiva, el diámetro del taladro y el diseño de la malla de perforación, el modelo permite estimar el tamaño característico de fragmentación conocido como P80, el cual representa el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material fragmentado. La aplicación de este modelo permite evaluar la eficiencia del diseño de voladura y optimizar los parámetros del proceso de fragmentación. (Cunningham, 1983; Cunningham, 1987).

2.2.4. Análisis de fragmentación mediante Split Desktop

La productividad de los equipos de carguío en minería superficial, medida usualmente en toneladas por hora (t/h), depende de múltiples factores, entre ellos la granulometría del material volado. Una fragmentación adecuada facilita la penetración del cucharón, reduce el tiempo por ciclo y prolonga la vida útil de los componentes mecánicos. Por el contrario, materiales sobredimensionados pueden disminuir la eficiencia y aumentar los costos operativos (Kecojevic & Komljenovic, 2011).

2.2.5. Control de la sobreexcavación en minería subterránea

La sobreexcavación en labores mineras subterráneas ocurre cuando el volumen excavado supera las dimensiones planificadas de la labor, generando problemas como dilución del mineral, incremento en el consumo de sostenimiento y mayores costos operativos. Este fenómeno se encuentra asociado principalmente al diseño de la voladura, ya que una

distribución inadecuada de la energía explosiva puede generar daños excesivos en el macizo rocoso circundante. El control de la sobreexcavación requiere un diseño adecuado de la malla de perforación y una correcta selección de los parámetros de voladura, lo que permite mantener la estabilidad del macizo rocoso y mejorar la eficiencia del proceso de excavación. (Hoek & Brown, 2019; Brady & Brown, 2006).

2.3. Definiciones

2.3.1. Voladura de Rocas

La voladura de rocas es un proceso de fragmentación del macizo rocoso mediante el uso controlado de explosivos colocados en taladros previamente perforados, con el propósito de facilitar la excavación y extracción del material. Este proceso constituye una etapa fundamental del ciclo de minado, ya que permite desprender el mineral o la roca estéril de manera eficiente para su posterior carguío y transporte. (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

2.3.2. Perforación minera

La perforación minera es la operación mediante la cual se realizan taladros en el macizo rocoso utilizando equipos de perforación especializados con el objetivo de alojar explosivos o realizar estudios geológicos y geotécnicos. En minería subterránea, la perforación se realiza generalmente con equipos manuales o mecanizados, como los equipos tipo Jack Leg, dependiendo de las condiciones de la labor minera. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

2.3.3. Fragmentación del macizo rocoso

La fragmentación del macizo rocoso es el proceso mediante el cual la roca se rompe en diferentes tamaños de partículas como resultado de la energía liberada durante la

detonación de los explosivos. La calidad de la fragmentación influye en la eficiencia de las operaciones posteriores de carguío, transporte y trituración. (Cunningham, 1987).

2.3.4. *Burden*

El burden es la distancia existente entre un taladro cargado con explosivo y la cara libre del macizo rocoso. Este parámetro es uno de los factores más importantes en el diseño de voladuras, ya que influye directamente en la eficiencia de la fragmentación y en la distribución de la energía explosiva dentro del macizo rocoso. (Konya & Walter, 1990).

2.3.5. *Espaciamiento*

El espaciamiento corresponde a la distancia entre taladros adyacentes dentro de una malla de perforación. Este parámetro se diseña en función del burden y de las características del macizo rocoso con el objetivo de lograr una fragmentación uniforme y evitar zonas de roca sin fragmentar. (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

2.3.6. *Factor de carga*

El factor de carga es la relación entre la cantidad de explosivo utilizado y el volumen de roca que se pretende fragmentar. Este indicador permite evaluar la eficiencia del uso de explosivos en el proceso de voladura y constituye un parámetro clave para optimizar el diseño de perforación y voladura. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

2.3.7. *Sobreexcavación*

La sobreexcavación se define como el volumen de roca excavado que excede las dimensiones planificadas de la labor minera. Este fenómeno suele generarse por una distribución inadecuada de la energía explosiva durante la voladura y puede provocar mayores costos de sostenimiento y dilución del mineral. (Hoek & Brown, 2019).

2.3.8. Productividad minera

La productividad minera se refiere a la eficiencia con la que se utilizan los recursos disponibles para lograr el avance de las labores mineras o la extracción del mineral. En labores de desarrollo subterráneo, la productividad suele medirse en metros de avance por disparo o metros de avance por día. (Brady & Brown, 2006).

2.3.9. Modelo Holmberg Persson

El modelo Holmberg-Persson es un método de diseño de voladuras subterráneas que permite determinar parámetros de perforación adecuados en función del diámetro del taladro, el tipo de explosivo y las propiedades del macizo rocoso. Este modelo es ampliamente utilizado en minería subterránea para optimizar la fragmentación y controlar el daño en el contorno de la excavación. (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

2.3.10. Modelo Kuz-Ram

El modelo Kuz-Ram es un modelo matemático utilizado para predecir la distribución granulométrica del material fragmentado durante una voladura. Este modelo combina la ecuación de Kuznetsov para estimar el tamaño medio de fragmentación y la función de Rosin-Rammler para describir la distribución de tamaños de partícula. (Cunningham, 1983).

2.3.11. P80

El P80 es un parámetro granulométrico que representa el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material fragmentado. Este indicador se utiliza comúnmente para evaluar la eficiencia del proceso de fragmentación generado durante la voladura. (Cunningham, 1987).

2.3.12. RMR (*Rock Mass Rating*)

El RMR es un sistema de clasificación geomecánica del macizo rocoso desarrollado para evaluar la calidad de la roca en función de parámetros como resistencia de la roca intacta, espaciamiento de discontinuidades, condición de las discontinuidades y presencia de agua. Este sistema es ampliamente utilizado en minería para el diseño de excavaciones subterráneas. (Bieniawski, 1989).

2.3.13. *JKSimBlast*

JKSimBlast es un software especializado utilizado para la simulación y diseño de voladuras en operaciones mineras. Esta herramienta permite modelar diferentes configuraciones de malla de perforación y analizar el comportamiento de la energía explosiva en el macizo rocoso antes de realizar la voladura en campo. (JKTech, 2023).

2.3.14. *Split Desktop*

Split Desktop es un software de análisis de fragmentación que utiliza procesamiento digital de imágenes para determinar la distribución granulométrica del material fragmentado. Esta herramienta permite evaluar de manera rápida y precisa el tamaño de las partículas generadas durante el proceso de voladura. (Split Engineering, 2023).

2.3.15. *Macizo Rocos*

El macizo rocoso es el conjunto de rocas intactas y discontinuidades geológicas que conforman el medio donde se desarrollan las excavaciones mineras. Las propiedades geomecánicas del macizo rocoso influyen directamente en el comportamiento de la voladura y en la estabilidad de las labores subterráneas. (Hoek & Brown, 2019).

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Alcances y Limitaciones

3.1.1. Alcances

La presente investigación se orientará a evaluar las mejoras en el diseño de perforación y voladura con el propósito de optimizar la sobreexcavación y aumentar la productividad en labores de desarrollo subterráneo. Para ello se analizarán y ajustarán parámetros del diseño de voladura tales como burden, espaciamiento, longitud de taladro, diámetro de perforación y factor de carga, aplicando herramientas de simulación y modelos matemáticos como JKSimBlast, el modelo Holmberg-Persson para el diseño de voladuras subterráneas y el modelo Kuz-Ram para la estimación de la fragmentación, complementado con el análisis granulométrico mediante el software Split Desktop. El estudio se realizará mediante la comparación de dos periodos operativos del año 2025, considerando el segundo trimestre. (abril, mayo y junio) sin implementación de mejoras y el tercer trimestre. (julio, agosto y septiembre) con la optimización del diseño de voladura, evaluando indicadores como fragmentación, sobreexcavación y avance por disparo. El área de estudio se desarrollará en la Unidad Minera Magistral, específicamente en la Galería +30 del Nivel 3, en labores con sección aproximada de 2.10 m por 2.40 m, bajo condiciones geomecánicas de RMR 55 % tipo IIB, utilizando perforación con equipo Jack Leg, barra de 6 pies y broca de 38 mm, donde se ejecuta una voladura diaria para el avance de la labor minera.

3.1.2. Limitaciones

La presente investigación se limita al análisis del proceso de perforación y voladura aplicado en labores de desarrollo subterráneo dentro de la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, por lo que los resultados obtenidos corresponden únicamente a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso evaluado, caracterizado por un RMR aproximado de 55 % tipo IIB. Asimismo, el estudio se restringe a la comparación de dos periodos operativos del año 2025, considerando el segundo trimestre. (abril, mayo y junio) sin implementación de mejoras y el tercer trimestre. (julio, agosto y septiembre) con la optimización del diseño de voladura, lo que implica que los resultados dependen de las condiciones operativas registradas durante dichos periodos. De igual manera, la investigación se enfoca únicamente en la evaluación de indicadores como fragmentación, sobreexcavación y productividad del avance, utilizando herramientas como JKSimBlast, Split Desktop, el modelo Holmberg-Persson y el modelo Kuz-Ram, sin considerar otros factores externos como variaciones en las condiciones geológicas locales, cambios en los equipos de perforación o modificaciones en la planificación operativa de la mina.

3.2. Tipo y Nivel de Investigación

3.2.1. Tipo de Investigación

La presente investigación será de tipo aplicada, debido a que se orientará a la solución de un problema técnico específico relacionado con el proceso de perforación y voladura en labores de desarrollo subterráneo. El estudio buscará mejorar el diseño de voladura con el propósito de optimizar el control de la sobreexcavación y aumentar la productividad del avance en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, mediante la aplicación de herramientas de simulación como JKSimBlast, el modelo Holmberg-Persson para el diseño

de voladuras subterráneas y el modelo Kuz-Ram para la estimación de la fragmentación del material volado. (Hernández, Fernández & Baptista, 2014; Persson, Holmberg & Lee, 1994.

3.2.2. Nivel de Investigación

El nivel de la investigación será explicativo, debido a que permitirá analizar la relación existente entre la optimización del diseño de voladura y sus efectos en la reducción de la sobreexcavación y el incremento de la productividad del avance en labores subterráneas. Este nivel permitirá determinar cómo las mejoras implementadas en los parámetros de perforación y voladura influyen en los resultados operativos del proceso de excavación minera. (Hernández et al., 2014).

3.3. Hipótesis de Investigación

3.3.1. Hipótesis General

- Evaluar la influencia de las mejoras en la voladura de rocas para optimizar la sobreexcavación y aumentar la productividad en la Galería +30 del Nivel 3 en una mina subterránea tipo A durante el año 2025.

3.3.2. Hipótesis específicas

- Determinar la influencia de la optimización del diseño de la malla de perforación mediante el modelo de Holmberg-Persson en el control de la sobreexcavación en la Galería +30 del Nivel 3.
- Analizar la mejora de la fragmentación del macizo rocoso mediante la predicción del tamaño P80 utilizando el modelo Kuz-Ram y su validación con el software Split Desktop.
- Evaluar el efecto de la optimización del diseño de voladura en la productividad del avance diario de la labor minera en la Unidad Minera Magistral

3.4. Variables

3.4.1. Variable Independiente

Las mejoras en la voladura de rocas corresponden al conjunto de optimizaciones aplicadas al diseño de perforación y carga explosiva con el objetivo de controlar la distribución de energía dentro del macizo rocoso y obtener una fragmentación más uniforme durante el proceso de excavación. Estas mejoras incluyen la optimización de parámetros como burden, espaciamiento, longitud de taladro, distribución del explosivo, secuencia de detonación y diseño de malla, los cuales pueden ser evaluados mediante herramientas de simulación y modelos matemáticos de predicción de fragmentación. En minería subterránea, el uso de modelos como Holmberg-Persson permite establecer parámetros de perforación adecuados para labores de desarrollo, mientras que el modelo Kuz-Ram permite estimar la distribución granulométrica del material volado. La aplicación de softwares especializados como JKSimBlast para simulación de voladuras y Split Desktop para el análisis de fragmentación contribuye a mejorar el control del proceso de voladura, permitiendo optimizar el rendimiento de las operaciones mineras. (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Cunningham, 1987; Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)

- VI1: Mejoras en la voladura de rocas

3.4.2. Variable Dependiente

La optimización de la sobreexcavación y la productividad en minería subterránea se refiere al control del volumen de roca excavada fuera del diseño geométrico de la labor minera y al incremento de la eficiencia en el avance de las labores de desarrollo. La sobreexcavación ocurre cuando el volumen excavado excede las dimensiones planificadas de la sección de la labor, lo cual genera mayores costos de sostenimiento, dilución del mineral y pérdida de

estabilidad en el macizo rocoso. La productividad, por su parte, se relaciona con la capacidad de obtener mayores avances efectivos por disparo o por día de trabajo, optimizando el ciclo de minado. La adecuada aplicación de técnicas de diseño de voladura permite mejorar la fragmentación del macizo rocoso, controlar los contornos de excavación y aumentar el rendimiento de las operaciones de carguío y transporte. En este sentido, el control de la fragmentación, la reducción de la sobreexcavación y la mejora en los avances de las labores constituyen indicadores clave para evaluar la eficiencia del proceso de voladura en minería subterránea. (Hoek & Brown, 2019; Brady & Brown, 2006; Konya & Walter, 1990).

- VD1: Optimización de la sobreexcavación.
- VD2: Optimización de la productividad).

3.4.3. Operacionalización de Variables

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Indicador	Medición	Unidad
VI1: Mejoras en la voladura de rocas	Se refiere a la optimización de los parámetros de perforación y voladura mediante el ajuste del diseño de malla, burden, espaciamiento, factor de carga, longitud de taladro y distribución del explosivo con el propósito de mejorar la fragmentación del macizo rocoso y controlar los contornos de excavación en labores subterráneas. Estas mejoras pueden evaluarse mediante herramientas de simulación como JKSimBlast y modelos de predicción como Holmberg-Persson y Kuz-Ram, los cuales permiten optimizar la distribución de energía explosiva en el macizo rocoso. (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Cunningham, 1987)	Burden	Distancia entre taladros de producción	m
		Espaciamiento	Separación entre taladros de la malla de perforación	m
		Factor de carga	Cantidad de explosivo utilizado por volumen de roca	kg/m ³
		Longitud de taladro	Profundidad efectiva de perforación	m
		Fragmentación	Tamaño característico del material fragmentado. (P80) evaluado con Split Desktop	mm

VD1: Sobreexcavación	La sobreexcavación corresponde al volumen de roca excavado fuera de las dimensiones de diseño de la labor minera. Este fenómeno ocurre cuando la energía de la voladura supera los límites del contorno planificado, generando mayor dilución, incremento en el consumo de sostenimiento y mayores costos operativos. El control de la sobreexcavación constituye un indicador importante de la eficiencia del diseño de voladura en minería subterránea. (Hoek & Brown, 2019; Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)	Área sobreexcavada	Diferencia entre la sección diseñada y la sección excavada	m ²
		Volumen sobreexcavado	Volumen adicional excavado fuera del contorno de diseño	m ³
		Porcentaje de sobreexcavación	Relación entre volumen excavado adicional y volumen diseñado	%
VD2: Productividad del avance	La productividad del avance en minería subterránea se refiere a la eficiencia con la que se logra el desarrollo de labores mediante el proceso de perforación y voladura. Esta productividad se expresa generalmente en términos de metros de avance por disparo o por día de operación, reflejando el rendimiento del ciclo de minado y la eficiencia de la fragmentación obtenida en la voladura. (Brady & Brown, 2006; Konya & Walter, 1990)	Avance por disparo	Longitud de avance obtenida en cada voladura	m/disparo
		Avance diario	Metros de avance obtenidos por día	m/día
		Eficiencia de avance	Relación entre avance real y avance planificado	%

Nota: Elaboración propia

3.5. Población y Muestra o Universo

3.5.1. Población

La población estará conformada por todas las voladuras realizadas en las labores de desarrollo subterráneo en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral durante el año 2025, donde se ejecuta una voladura diaria empleando equipos de perforación Jack Leg, barras de 6 pies de longitud y brocas de 38 mm de diámetro, en labores con sección de 2.10 m por 2.40 m, bajo condiciones geomecánicas de RMR 55 % tipo IIB. (Persson et al., 1994).

3.5.2. Muestra

La muestra estará constituida por las voladuras ejecutadas durante el segundo y tercer trimestre del año 2025, considerando el periodo abril, mayo y junio sin implementación de mejoras y el periodo julio, agosto y septiembre con la optimización del diseño de voladura. La comparación entre ambos periodos permitirá evaluar el impacto de las mejoras implementadas en el proceso de perforación y voladura. (Hernández et al., 2014).

3.6. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.6.1. Método de la Investigación

El método de investigación que se empleará será el método científico, el cual permitirá analizar el comportamiento del proceso de perforación y voladura mediante la observación sistemática, la recopilación de datos, el análisis de resultados y la contrastación de hipótesis. Este método permitirá evaluar la influencia de la optimización del diseño de voladura en la reducción de la sobreexcavación y en el incremento de la productividad del avance. (Hernández et al., 2014).

3.6.2. Técnicas de Recolección de Datos

Las técnicas de recolección de datos que se utilizarán serán la observación directa de campo, el registro de datos operativos de perforación y voladura, el análisis de fragmentación mediante procesamiento digital de imágenes y la revisión de reportes operativos de la unidad minera. Estas técnicas permitirán obtener información sobre los parámetros de voladura, el comportamiento de la fragmentación y el avance de las labores mineras. (Persson et al., 1994).

3.6.3. Instrumentos de Recolección de Datos

Para la recolección de la información necesaria en la investigación se utilizarán diferentes instrumentos que permitirán registrar y analizar los parámetros del proceso de perforación y voladura, así como evaluar los resultados obtenidos en términos de fragmentación, sobreexcavación y productividad del avance. Entre los instrumentos utilizados se considerarán fichas de registro de voladura, formatos de control de avance de labores, software de simulación de voladuras JKSimBlast para el diseño y análisis de la malla de perforación, y el software Split Desktop para el análisis de fragmentación mediante procesamiento digital de imágenes. Estos instrumentos permitirán obtener información técnica confiable sobre el comportamiento del material volado y la eficiencia del diseño de voladura aplicado en la labor minera. (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Split Engineering, 2023)

Instrumentos utilizados:

- Ficha de registro de parámetros de perforación y voladura.
- Registro de avance de labores mineras.
- Software de simulación de voladuras JKSimBlast.

- Software de análisis de fragmentación Split Desktop.
- Registro de medición de sección excavada para evaluar sobreexcavación:

3.7. Plan de Análisis de los Datos

3.7.1. Técnicas de Análisis de Datos

El análisis de los datos se realizará mediante técnicas de estadística descriptiva y análisis comparativo, evaluando indicadores como el tamaño de fragmentación P80, el nivel de sobreexcavación y el avance obtenido por disparo. Asimismo, se realizará una comparación entre los resultados obtenidos en el periodo sin mejora y el periodo con implementación del nuevo diseño de voladura, con el fin de determinar el impacto de las mejoras aplicadas en el proceso de perforación y voladura. (Cunningham, 1987).

3.8. Procedimiento de la Investigación

El procedimiento de la investigación permitirá desarrollar de manera ordenada las actividades necesarias para evaluar la influencia de las mejoras en el diseño de voladura en la optimización de la sobreexcavación y el incremento de la productividad del avance en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. Para ello se aplicarán herramientas de simulación, modelos de diseño de voladura y técnicas de análisis de fragmentación que permitirán comparar los resultados obtenidos en dos periodos operativos del año 2025. (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Cunningham, 1987)

- Se realizará el diagnóstico del diseño de perforación y voladura aplicado durante el segundo trimestre del año 2025. (abril, mayo y junio) sin implementación de mejoras.
- Se recopilarán los datos operativos relacionados con la perforación, carga explosiva, avance de la labor y fragmentación del material volado.
- Se analizarán los parámetros del diseño de voladura existente considerando burden,

espaciamiento, diámetro del taladro, longitud de perforación y factor de carga.

- Se desarrollará un nuevo diseño de malla de perforación utilizando el software JKSimBlast y el modelo de Holmberg-Persson para optimizar los parámetros de voladura.
- Se estimará la fragmentación esperada mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram.
- Se implementará el nuevo diseño de voladura durante el tercer trimestre del año 2025. (julio, agosto y septiembre)
- Se evaluará la fragmentación del material volado mediante el análisis de imágenes utilizando el software Split Desktop.
- Se medirán las dimensiones de la sección excavada para determinar el nivel de sobreexcavación.
- Se calculará el avance por disparo y los metros de avance por día para evaluar la productividad del proceso de desarrollo.
- Finalmente, se compararán los resultados obtenidos entre el periodo sin mejora y el periodo con la optimización del diseño de voladura para determinar el impacto de las mejoras aplicadas en el proceso de perforación y voladura.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de la evaluación del proceso de perforación y voladura en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, considerando la comparación entre dos periodos operativos del año 2025: el segundo trimestre. (sin implementación de mejoras) y el tercer trimestre. (con la optimización del diseño de voladura) El análisis se centra en los principales indicadores operativos definidos en la investigación, tales como la producción. (TPD), avance por disparo. (M), fragmentación del material volado. (P80), factor de carga. (kg/m^3) y el nivel de sobreexcavación. (%), los cuales permiten evaluar el comportamiento del proceso de voladura y su impacto en la eficiencia del ciclo de minado.

Para la obtención de los resultados se emplearon herramientas de simulación y análisis como JKSimBlast para el diseño de la malla de perforación, el modelo de Holmberg-Persson para la determinación de parámetros en minería subterránea, el modelo Kuz-Ram para la estimación de la fragmentación y el software Split Desktop para la validación granulométrica del material volado. Asimismo, se realizó el registro y procesamiento de datos operativos provenientes de las voladuras ejecutadas durante los meses evaluados, permitiendo establecer comparaciones entre los periodos sin mejora y con mejora.

Los resultados se presentan mediante tablas y análisis comparativos que permiten evidenciar la influencia de la optimización del diseño de voladura en el desempeño operativo de la labor minera. En este contexto, se analizará la variación de cada indicador, resaltando la mejora en la fragmentación del material volado, la reducción del porcentaje de

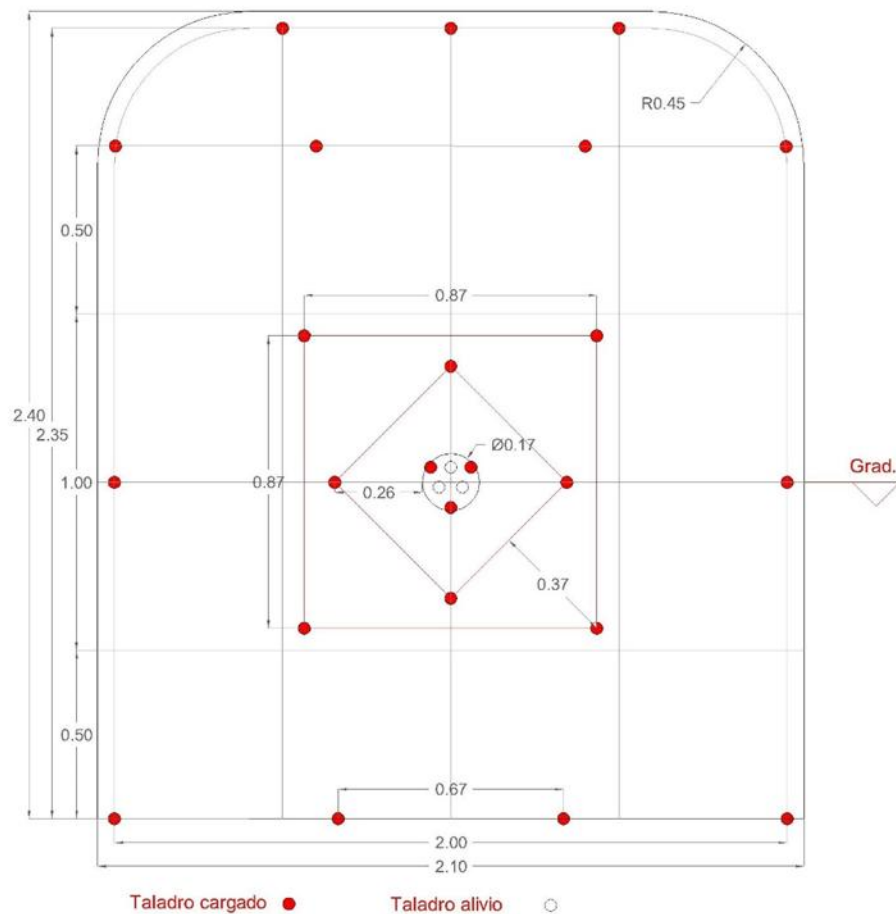
sobreexcavación y el incremento de la productividad del avance. Finalmente, los resultados obtenidos servirán como base para la contrastación de las hipótesis planteadas y la validación de los objetivos de la investigación.



4.1. Malla de perforación

Figura 1.

Malla perforación antes de la mejora en la Galería +30 del Nivel 3



- Taladro cargado: Taladros que contienen explosivo, destinados a generar la fragmentación del macizo rocoso.
- Taladro de alivio: Taladros sin carga explosiva, diseñados para generar una zona de expansión y facilitar la ruptura del macizo.
- 🔧 Dimensiones de la labor: Sección de 2.10 m × 2.40 m correspondiente al frente de avance.

-  Burden y espaciamiento: Distribución geométrica de los taladros, que condiciona la eficiencia de la voladura.
- Δ Gradiente. (Grad.): Dirección preferencial de salida de la voladura.
-  Zona de corte. (arranque): Conjunto de taladros centrales que inician la voladura y generan la cavidad inicial.

Nota: La malla presentada corresponde al diseño inicial sin optimización, caracterizado por una distribución convencional de taladros que genera fragmentación gruesa y mayor sobreexcavación.

Tabla 2.

Estadísticos descriptivos antes y después de la optimización del factor de carga

Mes	TPD	M	P80	KG/M3	%
Mes 1	195.13	1.29	9.80	3.965	28.96%
Mes 2	193.90	1.30	9.77	3.975	28.97%
Mes 3	194.93	1.32	9.71	3.961	29.09%
Total	194.65	1.30	9.76	3.967	29.01%

Nota: Resultados de los parámetros de producción, avance por disparo, fragmentación, factor de carga y sobreexcavación de los meses de abril, mayo y junio del 2025.

Durante el segundo trimestre del año 2025, correspondiente al periodo sin mejora en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos evidenciaron un comportamiento estable, pero sin mejoras significativas en el desempeño del proceso de perforación y voladura. La producción. (TPD) presentó valores de 195.13, 193.90 y 194.93, alcanzando un promedio de 194.65 TPD, lo que refleja una operación constante. Asimismo, el avance por disparo. (M) se mantuvo en torno a 1.29 a 1.32 m/disparo, con un promedio de 1.30 m/disparo, indicando un rendimiento moderado en el avance de la labor.

En cuanto a la fragmentación. (P80), se registraron valores de 9.80, 9.77 y 9.71 pulgadas, con un promedio de 9.76 pulgadas, lo que evidencia una fragmentación relativamente gruesa del material volado. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m³) presentó un promedio de 3.967 kg/m³, manteniendo una dosificación uniforme de explosivo, pero sin lograr mejoras en la eficiencia del proceso. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se mantuvo en un promedio de 29.01 %, evidenciando un control limitado del contorno de la excavación. En conjunto, estos resultados reflejan un escenario operativo estable, pero con deficiencias en la fragmentación y en el control de la sobreexcavación, lo que justifica la necesidad de implementar mejoras en el diseño de voladura.

4.2. Aplicación de fórmulas de Holmberg-Persson para el tercer trimestre

Para el diseño de la voladura subterránea en la Galería +30 del Nivel 3, durante el tercer trimestre de 2025, se aplicó el enfoque de Holmberg-Persson en los taladros de contorno, tomando como base el diámetro de perforación de 38 mm, la longitud de barreno de 6 pies. (1.83 m) y la necesidad de controlar la sobreexcavación en un macizo rocoso de RMR 55% tipo IIB. En este enfoque, para contorno con smooth blasting, el espaciamiento es función lineal del diámetro del taladro, con una constante k entre 15 y 16, y además se recomienda una relación E/V = 0.8 para estimar el burden teórico. También se usa la expresión del burden práctico corrigiendo por lookout y desviación de perforación.

4.2.1. Cálculo del espaciamiento teórico

La expresión utilizada es:

$$E = k \cdot d$$

Donde:

- E = espaciamiento entre taladros de contorno. (m)

- k = constante de Holmberg-Persson para smooth blasting de 15
- d = diámetro del taladro. (m)

Reemplazando:

$$d = 38 \text{ mm} = 0.038 \text{ m}$$

Tomando un valor conservador de $k=15$:

$$E = 15 \times 0.038 = 0.57 \text{ m}$$

Por lo tanto, el espaciamiento teórico para el tercer trimestre fue:

$$E = 0.57 \text{ m}$$

Esta relación lineal entre espaciamiento y diámetro del taladro, con k entre 15 y 16, es la recomendada para taladros de contorno bajo smooth blasting.

4.2.2. Cálculo del burden teórico

Holmberg-Persson recomienda para smooth blasting una relación:

$$\frac{E}{B} = 0.8$$

Despejando:

$$B = \left(\frac{E}{0.8} \right)$$

Reemplazando:

$$B = \frac{0.57}{0.8} = 0.7125 \text{ m}$$

Entonces, el burden teórico es:

$$B = 0.71 \text{ m}$$

El criterio $E/B = 0.8$ se usa específicamente para contorno con smooth blasting.

4.2.3. Cálculo del burden práctico

La expresión empleada para burden práctico es:

$$Bp = B - H \sin \gamma - F$$

Donde:

- Bp = burden práctico. (m)
- B = burden teórico. (m)
- H = longitud del taladro. (m)
- γ = ángulo de lookout
- F = desviación de perforación

Como en el ejemplo clásico del método se usa un lookout aproximado de 3° , y en esta investigación la longitud del barreno fue de 1.83 m, primero se corrige sin considerar desviación, porque ese dato no ha sido especificado:

$$Bp = 0.7125 - 1.83 \sin 3^\circ$$

$$Bp = 0.7125 - 1.83(0.05234)$$

$$Bp = 0.7125 - 0.0958$$

$$Bp = 0.6167 \text{ m}$$

Por tanto, el burden práctico corregido por lookout fue aproximadamente:

$$Bp \approx 0.62 \text{ m}$$

Si posteriormente se dispone de la desviación real de perforación F , este valor puede ajustarse con mayor precisión. La expresión del burden práctico y el uso de un lookout cercano a 3° aparecen en la formulación aplicada del método.

4.2.4. Cálculo de la carga lineal mínima para smooth blasting

La expresión reportada para la carga lineal mínima en smooth blasting es:

$$I = 90 d^2$$

Donde:

- I = carga lineal mínima. (kg/m)
- d = diámetro del taladro. (m)

Reemplazando:

$$I = 90(0.038)^2$$

$$I = 90(0.001444)$$

$$I = 0.12996 \text{ kg/m}$$

Por tanto, la carga lineal mínima recomendada fue:

$$I \approx 0.13 \text{ kg/m}$$

Esta ecuación se usa para diámetros de perforación menores a 0.15 m en smooth blasting.

Con la aplicación del método de Holmberg-Persson en la Galería +30, para taladros de 38 mm y longitud de 1.83 m, se obtuvo un espaciamiento teórico de 0.57 m, un burden teórico de 0.71 m, un burden práctico aproximado de 0.62 m y una carga lineal mínima de 0.13 kg/m. Estos parámetros son consistentes con una voladura de contorno orientada al control de daño y a la reducción de la sobreexcavación. En el tercer trimestre, esta optimización se reflejó en mejores indicadores operativos, con TPD de 231.19, P80 de 7.97, factor de carga de 4.153 kg/m³ y sobreexcavación de 0.16, valores superiores al desempeño observado en el segundo trimestre según tus datos de campo.

Desde el punto de vista técnico, la aplicación del método permitió definir una

geometría de contorno más controlada, lo cual favoreció una distribución más uniforme de la energía explosiva y un menor daño hacia el macizo remanente. El burden práctico de 0.62 m y el espaciamiento de 0.57 m muestran una configuración más ajustada para labores de pequeña sección, lo que resulta coherente con el objetivo de disminuir la sobreexcavación y mejorar la calidad del contorno. De manera complementaria, la reducción del P80 de 9.76 a 7.97 y de la sobreexcavación de 0.29 a 0.16 entre el segundo y el tercer trimestre sugiere que el rediseño tuvo un efecto favorable en la fragmentación y en el control geométrico de la excavación.

La aplicación del método de Holmberg-Persson en el tercer trimestre permitió establecer parámetros de diseño más adecuados para la voladura de contorno en la Galería +30 del Nivel 3. Considerando un diámetro de broca de 38 mm y una longitud de perforación de 1.83 m, se determinó un espaciamiento teórico de 0.57 m, un burden teórico de 0.71 m, un burden práctico aproximado de 0.62 m y una carga lineal mínima de 0.13 kg/m. Estos parámetros favorecieron un mejor control del contorno excavado, lo cual se reflejó en una reducción de la sobreexcavación a 0.16 y en una mejora de la fragmentación, alcanzando un P80 de 7.97 durante el tercer trimestre.

4.2.5. Aplicación del modelo Kuz-Ram para el tercer trimestre

Durante el tercer trimestre del año 2025 se aplicó el modelo Kuz-Ram para estimar la fragmentación del material volado en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, a partir de los parámetros del diseño optimizado de perforación y voladura. Para ello se consideró un avance por disparo de 1.50 m, un burden práctico de 0.62 m, un espaciamiento de 0.57 m, un total de 19.80 kg de explosivo por disparo, y 30 taladros cargados, con el propósito de estimar el tamaño medio de fragmentación y posteriormente el

valor del P80.

4.2.6. *Volumen de roca por taladro*

Primero se calculó el volumen de roca influenciado por cada taladro cargado, mediante la expresión:

$$V_h = B \times E \times A$$

Donde:

- V_h = volumen de roca por taladro
- B = burden práctico
- E = espaciamiento
- A = avance por disparo

Reemplazando:

$$V_h = 0.62 \times 0.57 \times 1.50$$

$$V_h = 0.5301 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el volumen de roca por taladro fue de:

$$V_h = 0.53 \text{ m}^3$$

4.2.7. *Carga explosiva por taladro*

La carga promedio por taladro cargado se obtuvo con la siguiente relación:

Donde

$$Q_h = \frac{Q_t}{N_c}$$

Donde,

- Q_h = carga por taladro
- Q_t = carga total por disparo

- Nc = número de taladros cargados

Reemplazando:

$$Q_h = \frac{19.80}{26}$$

$$Q_h = 0.7615 \text{ kg}$$

Por tanto, la carga promedio por taladro fue:

$$Q_h = 0.76 \text{ kg/taladro}$$

4.2.8. *Tamaño medio de fragmentación según Kuznetsov modificado*

Para la estimación del tamaño medio de fragmentación se empleó la ecuación de Kuznetsov modificada dentro del modelo Kuz-Ram

$$X_{50} = A \left(\frac{V_h}{Q_h} \right)^{0.8} * Q_h^{\frac{1}{6}} * \left(\frac{115}{RWS} \right)^{\frac{19}{30}}$$

Donde:

- X50 = tamaño medio de fragmentación
- A = factor de roca
- Vh = volumen por taladro
- Qh = carga por taladro
- RWS = resistencia relativa del explosivo

Para el tercer trimestre se adoptó un factor de roca A=11.5, coherente con un macizo rocoso de competencia media a media alta, asociado a RMR 55 % tipo IIB, y se consideró RWS = 100 para el ANFO como base de cálculo. Sustituyendo:

La relación aplicada fue:

$$P80 = X_{50} \left(\frac{\ln 5}{\ln 2} \right)^{1/n}$$

Sabemos que:

$$\left(\frac{\ln 5}{\ln 2}\right)^{1/0.90} \approx 2.5498$$

Entonces:

$$P80 = 7.92 * 2.5498$$

$$P80 = 20.19 \text{ cm}$$

Convirtiendo a pulgadas:

$$P80 = \frac{20.19}{2.54}$$

$$P80 = 7.95 \text{ pulgadas}$$

Por lo tanto, el P80 estimado mediante Kuz-Ram para el tercer trimestre es de 7.95 pulgadas

En consecuencia, el tamaño medio de fragmentación estimado para el tercer trimestre fue:

$$X50 = 7.92 \text{ cm}$$

4.2.9. Cálculo del índice de uniformidad

Para transformar el tamaño medio en el valor del P80, se utilizó la distribución de Rosin-Rammler. Debido a que la malla correspondió a una labor subterránea con taladros de arranque, ayudas, cuadradores, corona y arrastre, se asumió un índice de uniformidad $n=0.90$, valor compatible con una distribución heterogénea de cargas dentro del round. La relación aplicada fue:

Los factores numéricos usados en el ajuste de Rosin-Rammler y en la estimación base del tamaño medio son consistentes con los cálculos efectuados para esta aplicación.

La aplicación del modelo Kuz-Ram al diseño optimizado del tercer trimestre permitió estimar una fragmentación de $P80 = 7.95$ pulgadas, valor muy cercano al P80 real obtenido

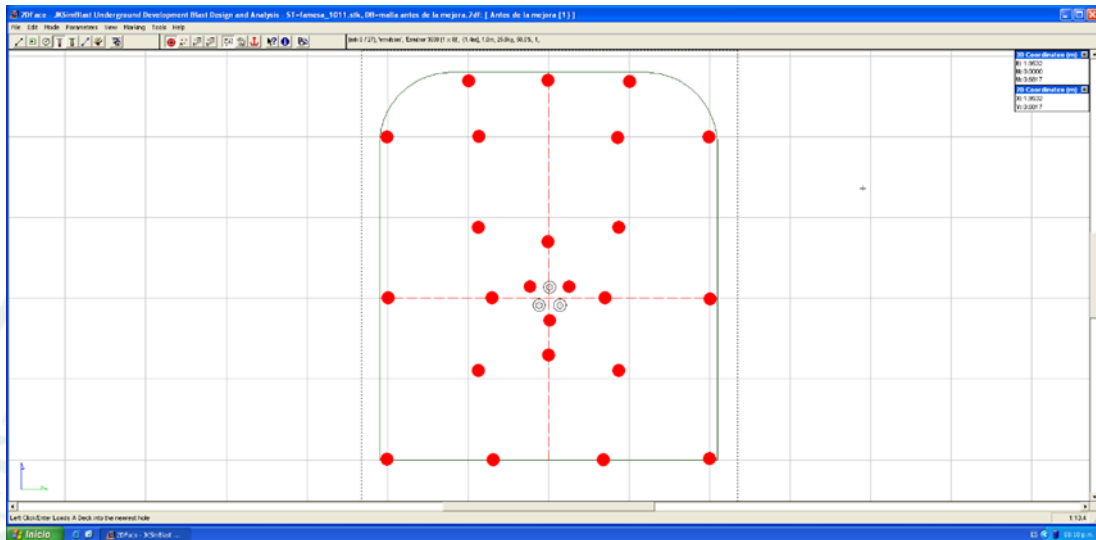
en campo de 7.97 pulgadas. Esta proximidad demuestra que la malla implementada en el tercer trimestre presentó un comportamiento técnico consistente, ya que la distribución de carga, el burden práctico, el espaciamiento y el avance por disparo generaron una fragmentación adecuada para mejorar el rendimiento del proceso de carguío y reducir la presencia de sobredimensionados. La diferencia entre el valor teórico y el valor real fue mínima, de aproximadamente 0.02 pulgadas, lo cual valida la aplicación del modelo Kuz-Ram como herramienta de predicción de la fragmentación en la labor evaluada.

Durante el tercer trimestre del año 2025 se aplicó el modelo Kuz-Ram para estimar la fragmentación del material volado en la Galería +30 del Nivel 3. Considerando un burden práctico de 0.62 m, un espaciamiento de 0.57 m, un avance por disparo de 1.50 m, una carga total de 27.91 kg de explosivo y 30 taladros cargados, se obtuvo un volumen de influencia por taladro de 0.53 m³ y una carga promedio de 0.93 kg/taladro. Con un factor de roca de 11.5 y una resistencia relativa del explosivo de 100, el tamaño medio de fragmentación fue de 7.92 cm. Posteriormente, aplicando la distribución de Rosin-Rammler con un índice de uniformidad de 0.90, se estimó un P80 teórico de 7.95 pulgadas, valor muy cercano al P80 real de 7.97 pulgadas registrado en el tercer trimestre, lo cual confirmó que la malla optimizada permitió obtener una fragmentación adecuada y técnicamente coherente con los objetivos de mejora del proceso de voladura.

4.3. Simulación JKSImblast antes de la mejora

Figura 2.

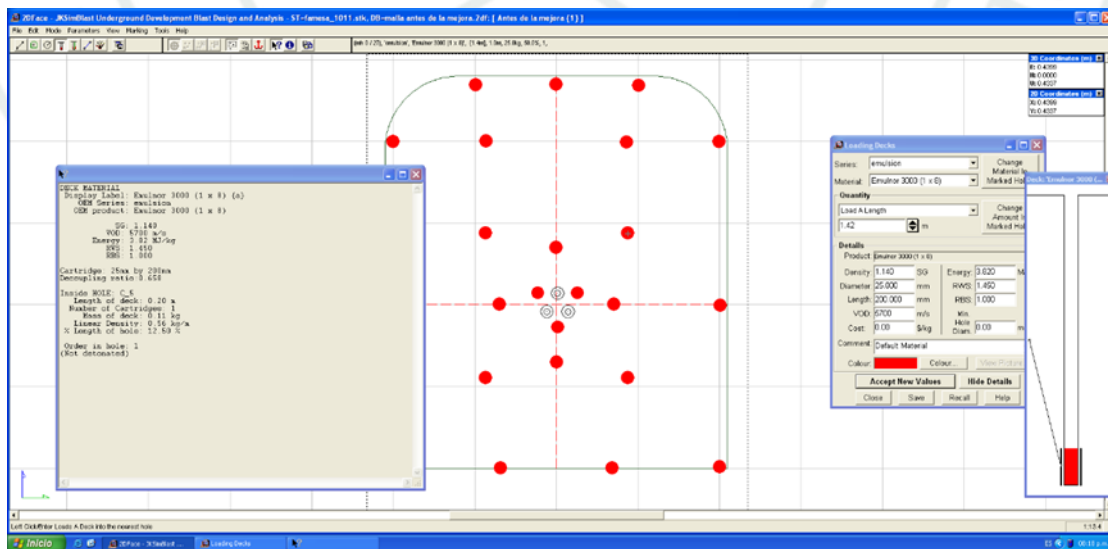
Malla de perforación



Nota: Elaboración propia

Figura 3.

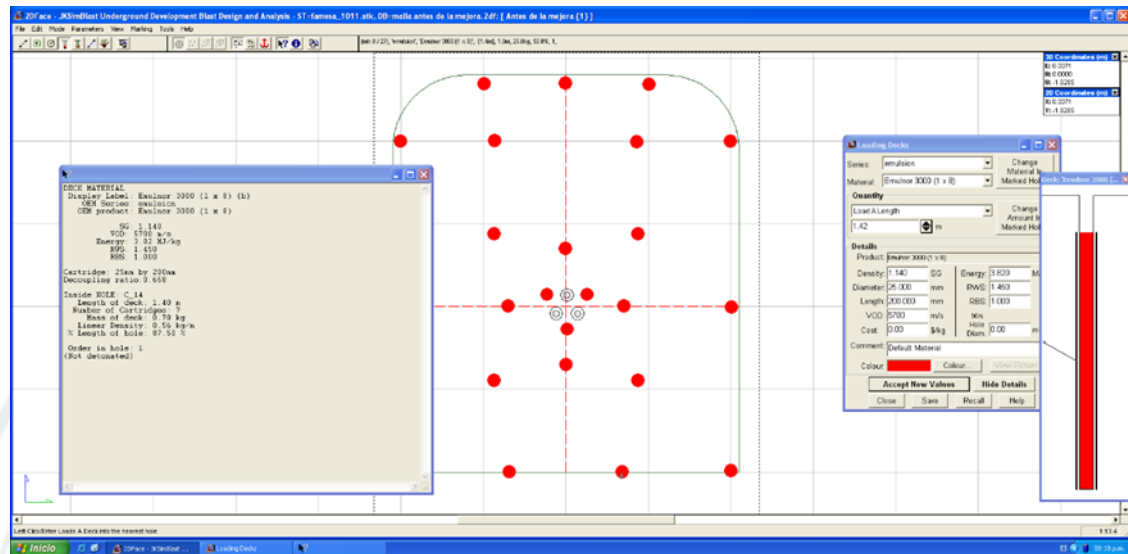
Primado de taladros



Nota: Elaboración propia

Figura 4.

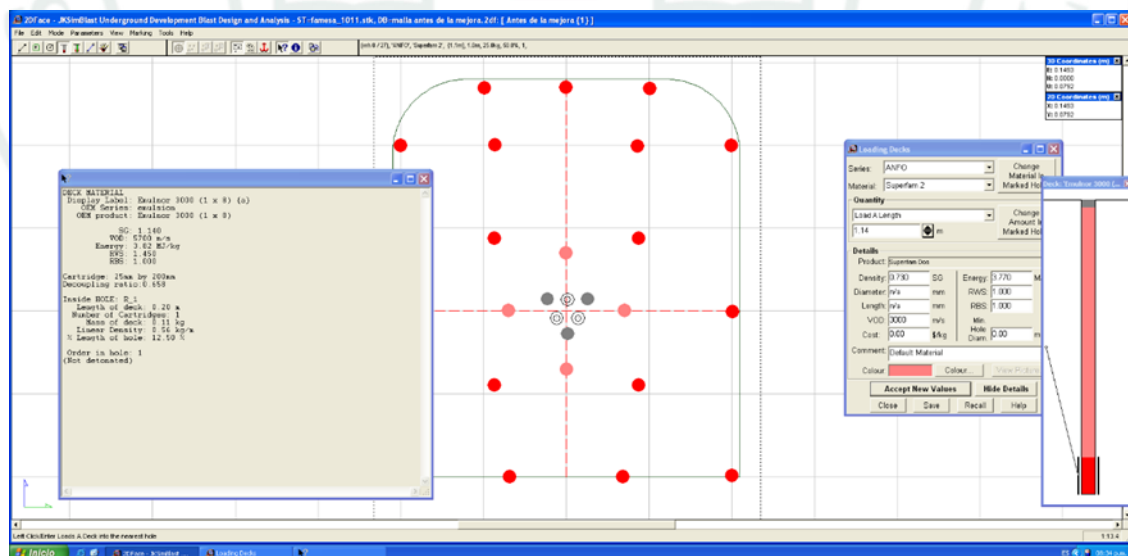
Carguío de taladros



Nota: Elaboración propia

Figura 5.

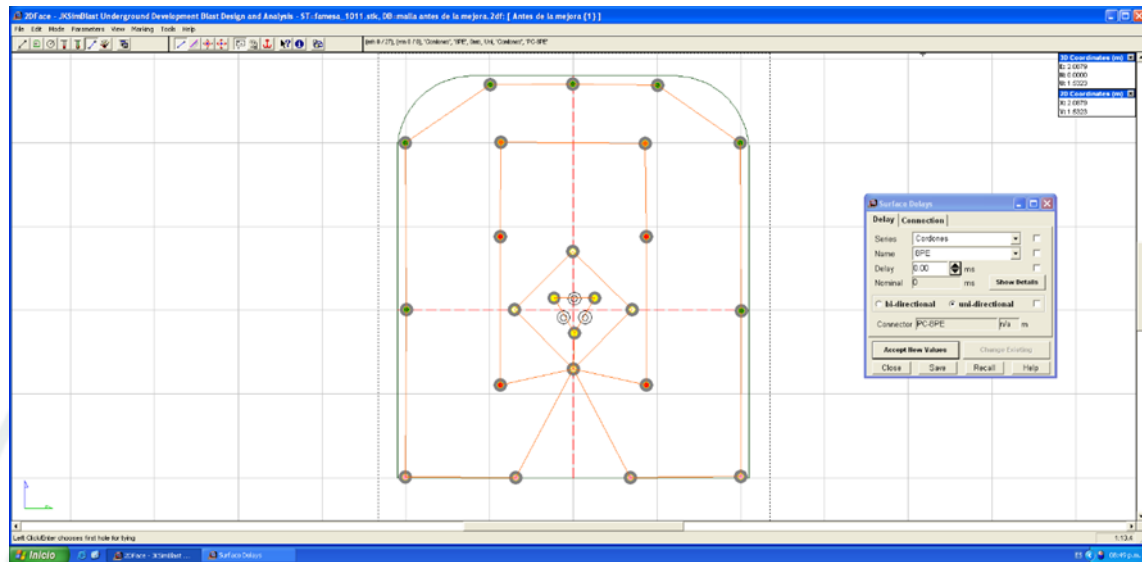
Taco de carga



Nota: Elaboración propia

Figura 6.

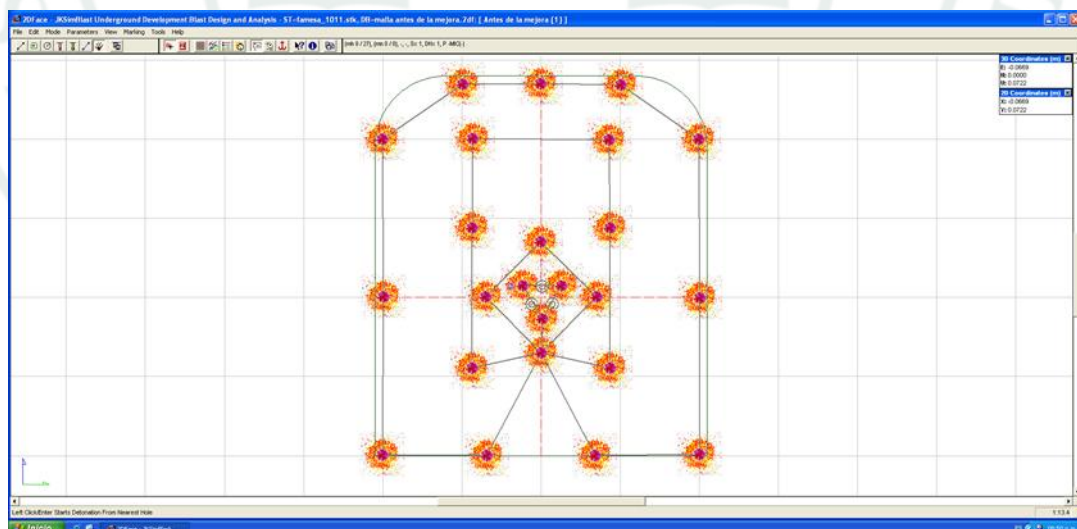
Amarre de taladros



Nota: Elaboración propia

Figura 7.

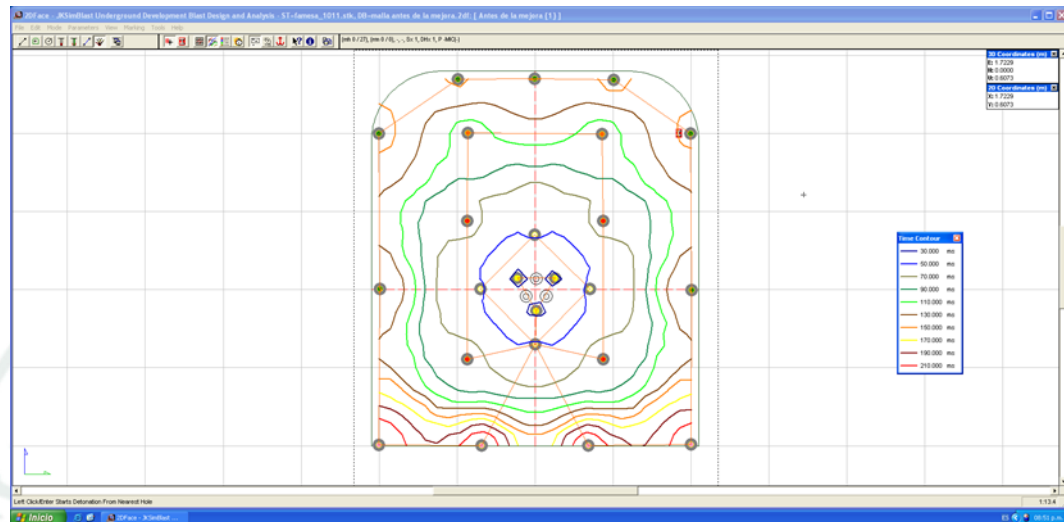
Detonación de salida



Nota: Elaboración propia

Figura 8.

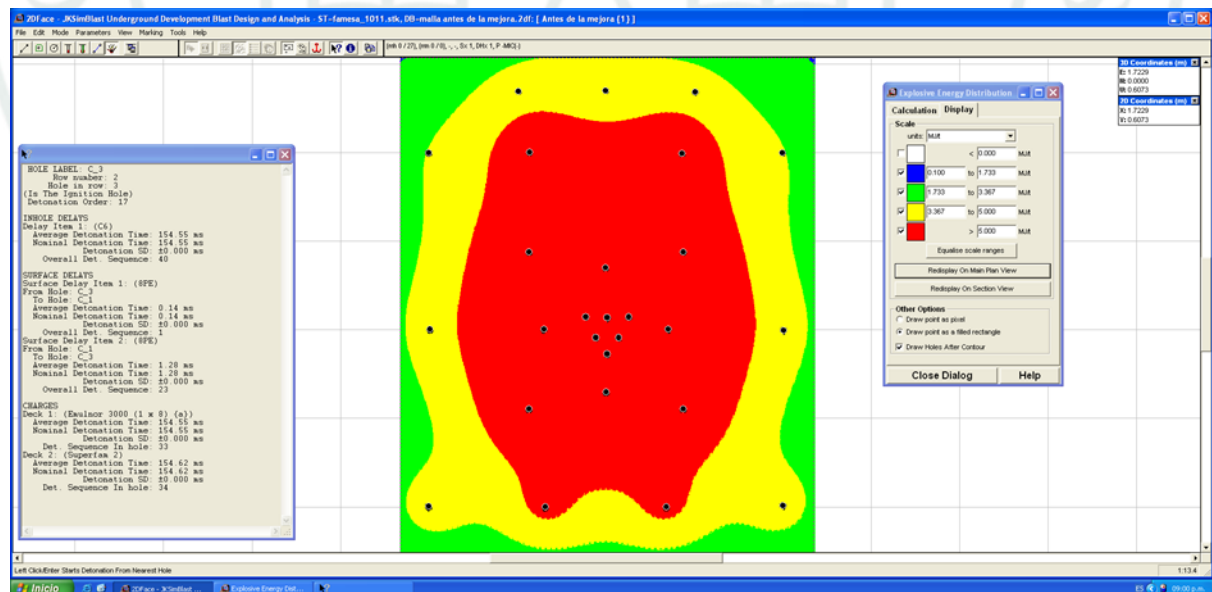
Curvas de energía



Nota: Elaboración propia

Figura 9.

Campo de energía

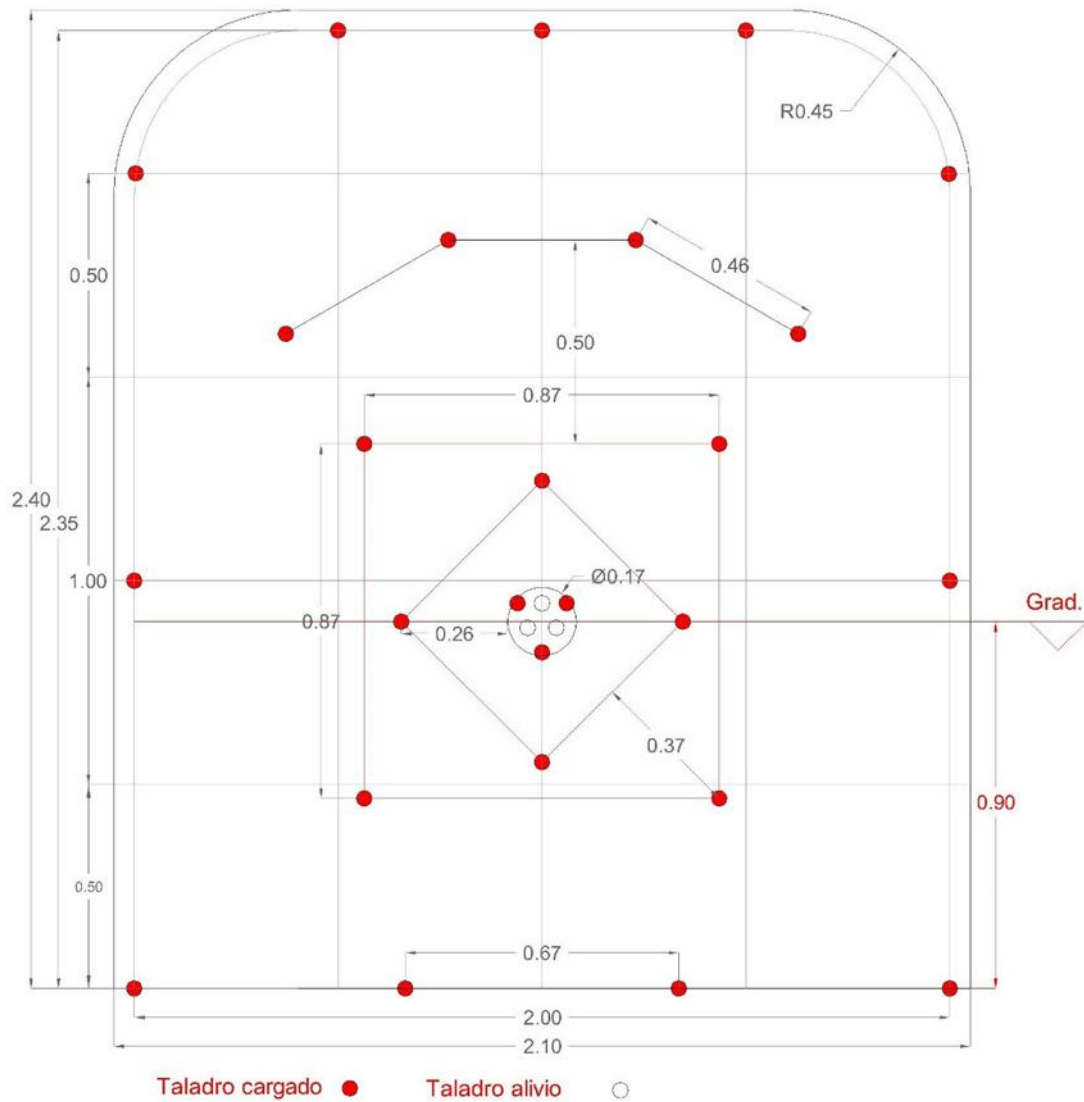


Nota: Elaboración propia

4.4. Diseño de carga en galería después de la mejora

Figura 10.

Malla después de la mejora



- Taladro cargado: Taladros con explosivo distribuidos estratégicamente para mejorar la fragmentación y el control del contorno.
- Taladro de alivio: Taladros sin carga que generan la cara libre inicial, facilitando

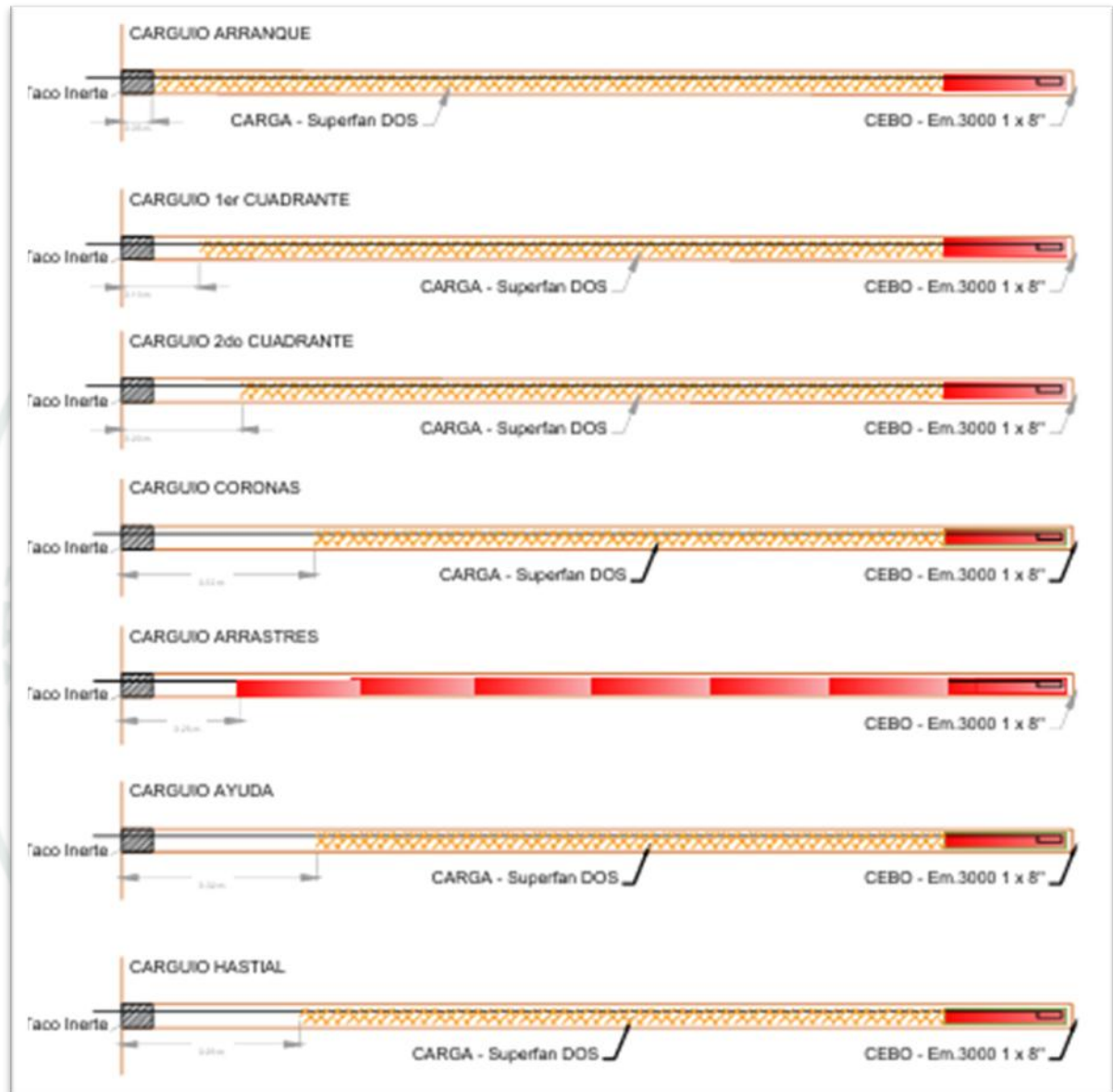
la ruptura del macizo rocoso.

-  Dimensiones de la labor: Sección de 2.10 m × 2.40 m correspondiente al frente de avance.
-  Burden y espaciamiento optimizado: Rediseño de la distribución de taladros que permite una mejor interacción de la energía explosiva.
- Δ Gradiente. (Grad.): Dirección de salida de la voladura, orientando el desplazamiento del material.
-  Zona de corte. (arranque): Configuración central optimizada que mejora el inicio de la voladura y la generación de cara libre.
-  Ajuste de contorno: Redistribución de taladros perimetrales para reducir la sobreexcavación y mejorar la estabilidad de la excavación.

Nota: La malla optimizada evidencia una mejor distribución de taladros y energía explosiva, permitiendo obtener una fragmentación más uniforme, mayor avance por disparo y una reducción significativa de la sobreexcavación

Figura 11.

Distribución de carga



Nota: Elaboración propia

Tabla 3.*Carga por taladro*

TIPO	CANTIDAD	Em.3000. (1x8")	Superfam DOS. (Kg)
Arranque	3	3	2.22
1° Cuadrante	4	4	2.96
2° Cuadrante	4	4	2.96
Corona	5	5	3.49
Ayuda corona	4	4	2.22
Hastial	2	2	2.79
Arrastre	4	24	0
TOTAL	26	46	

Nota: Elaboración propia**Tabla 4.***Parámetros tercer trimestre*

Mes	TPD	M	P80	KG/M3	%
Mes 1	231.48	1.59	7.98	4.159	16.0%
Mes 2	231.26	1.61	7.95	4.165	16.1%
Mes 3	230.83	1.63	7.97	4.152	16.0%
Total	231.20	1.61	7.97	4.159	16.1%

Nota: Resultados de los parámetros de producción, avance por disparo, fragmentación, factor de carga y sobreexcavación de los meses de julio, agosto y septiembre del 2025

Durante el tercer trimestre del año 2025, correspondiente al periodo con implementación de la malla optimizada de perforación y voladura en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos evidenciaron una mejora significativa y sostenida en el desempeño del proceso. La producción. (TPD) alcanzó valores de 231.48, 231.26 y 230.83, obteniendo un promedio de 231.20 TPD, lo que refleja un incremento notable respecto al periodo anterior. Asimismo, el avance por disparo. (M) se incrementó progresivamente de 1.59 a 1.63 m/disparo, con un promedio de 1.61 m/disparo, evidenciando una mayor eficiencia en el desarrollo de la labor minera.

En relación con la fragmentación. (P80), los valores se mantuvieron entre 7.95 y 7.98 pulgadas, con un promedio de 7.97 pulgadas, lo que indica una fragmentación más fina y uniforme del material volado. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) presentó un promedio de $4.159 \text{ kg}/\text{m}^3$, mostrando una dosificación adecuada del explosivo que permitió una mejor liberación de energía en el macizo rocoso. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se redujo significativamente, alcanzando un promedio de 16.1 %, lo que evidencia un adecuado control del contorno de la excavación.

4.5. Resultados por objetivos

4.5.1. Resultados objetivo general

Evaluar la influencia de las mejoras en la voladura de rocas para optimizar la sobreexcavación y aumentar la productividad en la Galería +30 del Nivel 3 en una mina subterránea tipo A durante el año 2025.

Los resultados evidenciaron que la implementación del diseño optimizado de voladura generó mejoras significativas en los indicadores operativos. La producción. (TPD) se incrementó de 194.66 a 231.19 TPD, representando un aumento del 18.77 %, mientras que el avance por disparo. (M) se elevó de 1.30 a 1.61 m/disparo, con una mejora del 24 %. Asimismo, la fragmentación. (P80) se redujo de 9.76 a 7.97 pulgadas, logrando una mejora del 18.38 %, y la sobreexcavación. (%) disminuyó de 29 % a 16 %, equivalente a una reducción del 44.60 %. Estos resultados demuestran que la optimización del diseño de voladura influyó positivamente en la productividad y en el control del contorno de la excavación.

4.5.2. Resultados objetivo específico 1

Determinar la influencia de la optimización del diseño de la malla de perforación mediante el modelo de Holmberg-Persson en el control de la sobreexcavación.

Los resultados muestran que la aplicación del modelo de Holmberg-Persson permitió un control más eficiente del contorno de la excavación, reduciendo la sobreexcavación de 0.29 a 0.16, lo que representa una disminución del 44.60 %. Este comportamiento se debe a una mejor distribución de los taladros de contorno, un adecuado burden y espaciamiento, así como una correcta dosificación de explosivos, lo que permitió minimizar el daño al macizo rocoso y mejorar la estabilidad de la labor.

4.5.3. Resultados objetivo específico 2

Analizar la mejora de la fragmentación del macizo rocoso mediante la predicción del tamaño P80 utilizando el modelo Kuz-Ram y su validación con el software Split Desktop.

Los resultados evidenciaron que la fragmentación. (P80) mejoró significativamente al reducirse de 9.76 a 7.97 pulgadas, lo que representa una mejora del 18.38 %. La aplicación del modelo Kuz-Ram, validada con el software Split Desktop, permitió obtener una distribución granulométrica más uniforme, favoreciendo las operaciones de carguío y transporte, y reduciendo la necesidad de voladura secundaria.

4.5.4. Resultados objetivo específico 3

Evaluar el efecto de la optimización del diseño de voladura en la productividad del avance diario de la labor minera.

Los resultados muestran un incremento significativo en la productividad, aumento del avance por disparo de 1.30 a 1.61 m/disparo. (24 %) y de la producción de 194.66 a 231.19 TPD. (18.77 %) Estos resultados demuestran que la optimización del diseño de voladura

permitió una mayor eficiencia en el proceso de minado, reduciendo tiempos operativos y mejorando el rendimiento global de la operación minera.

Tabla 5.

Parámetros abril 2025

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	TPD	M	P80	KG/M3	%
Segundo trimestre	Mes 1	abril	1/04/2025	198.00	1.30	10.00	4.004	0.30
Segundo trimestre	Mes 1	abril	2/04/2025	196.00	1.27	9.95	3.992	0.28
Segundo trimestre	Mes 1	abril	3/04/2025	197.00	1.33	9.66	3.960	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	4/04/2025	195.00	1.29	9.70	4.002	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	5/04/2025	195.00	1.30	9.85	3.968	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	6/04/2025	200.00	1.33	9.92	4.023	0.30
Segundo trimestre	Mes 1	abril	7/04/2025	191.00	1.28	9.72	3.931	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	8/04/2025	196.00	1.31	10.00	3.923	0.30
Segundo trimestre	Mes 1	abril	9/04/2025	190.00	1.29	9.86	3.973	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	10/04/2025	194.00	1.27	9.55	3.962	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	11/04/2025	199.00	1.31	9.55	3.966	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	12/04/2025	195.00	1.33	9.93	4.001	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	13/04/2025	199.00	1.33	9.72	3.929	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	14/04/2025	191.00	1.27	9.82	3.978	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	15/04/2025	193.00	1.29	9.77	3.938	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	16/04/2025	193.00	1.27	9.87	3.958	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	17/04/2025	196.00	1.32	9.77	3.962	0.28
Segundo trimestre	Mes 1	abril	18/04/2025	192.00	1.29	10.00	3.996	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	19/04/2025	198.00	1.28	9.64	3.952	0.28
Segundo trimestre	Mes 1	abril	20/04/2025	190.00	1.30	9.93	3.933	0.28
Segundo trimestre	Mes 1	abril	21/04/2025	196.00	1.27	9.95	3.933	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	22/04/2025	193.00	1.33	9.58	4.011	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	23/04/2025	194.00	1.30	9.75	3.920	0.30
Segundo trimestre	Mes 1	abril	24/04/2025	196.00	1.31	9.74	3.952	0.30
Segundo trimestre	Mes 1	abril	25/04/2025	197.00	1.27	9.73	3.935	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	26/04/2025	190.00	1.31	9.71	3.955	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	27/04/2025	199.00	1.28	9.61	3.986	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	28/04/2025	199.00	1.31	9.81	4.017	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	29/04/2025	197.00	1.32	9.92	3.945	0.29
Segundo trimestre	Mes 1	abril	30/04/2025	195.00	1.29	9.87	3.942	0.29
Promedio				195.13	1.29	9.80	3.965	0.29

Nota: Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de abril del primer

trimestre, incluyendo producción. (T/H), avance por disparo, fragmentación. (P80), factor de carga y sobreexcavación del 2025

Durante el mes de abril del segundo trimestre del año 2025, en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos evidenciaron un comportamiento estable propio de un proceso de perforación y voladura sin optimización. La producción (TPD) osciló entre 190.00 y 200.00 toneladas por día, alcanzando un promedio de 195.13 TPD, lo que refleja una operación constante sin incrementos significativos en el rendimiento. Asimismo, el avance por disparo. (M) se mantuvo en un rango de 1.27 a 1.33 m/disparo, con un promedio de 1.29 m/disparo, evidenciando una eficiencia moderada en el desarrollo de la labor minera.

En relación con la fragmentación. (P80), los valores se situaron entre 9.55 y 10.00 pulgadas, con un promedio de 9.80 pulgadas, lo que indica la presencia de material relativamente grueso producto de una distribución no óptima de la energía explosiva. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) presentó un promedio de $3.965 \text{ kg}/\text{m}^3$, manteniéndose constante durante el periodo, pero sin generar mejoras en la calidad del proceso. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se mantuvo en torno a 0.29, evidenciando un control limitado del contorno de la excavación. En conjunto, estos resultados reflejan un escenario operativo uniforme, pero con deficiencias en la fragmentación y en el control de la sobreexcavación, lo que justifica la implementación de mejoras en el diseño de voladura en el siguiente periodo

Tabla 6.*Parámetros de mayo 2025*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	TPD	M	P80	KG/M3	%
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	1/05/2025	194.00	1.31	10.00	3.983	0.30
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	2/05/2025	198.00	1.31	9.99	3.987	0.30
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	3/05/2025	194.00	1.27	9.65	4.010	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	4/05/2025	191.00	1.27	9.91	3.913	0.28
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	5/05/2025	190.00	1.32	9.58	3.999	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	6/05/2025	190.00	1.29	9.60	4.016	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	7/05/2025	196.00	1.27	9.81	3.999	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	8/05/2025	198.00	1.28	9.66	3.982	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	9/05/2025	193.00	1.30	9.92	3.974	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	10/05/2025	191.00	1.29	9.82	3.992	0.30
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	11/05/2025	192.00	1.32	9.55	4.016	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	12/05/2025	196.00	1.27	9.97	3.954	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	13/05/2025	195.00	1.28	9.72	3.990	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	14/05/2025	198.00	1.31	9.79	3.993	0.28
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	15/05/2025	193.00	1.33	9.50	3.999	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	16/05/2025	194.00	1.28	9.71	3.952	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	17/05/2025	195.00	1.28	9.65	3.996	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	18/05/2025	193.00	1.27	9.71	3.965	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	19/05/2025	192.00	1.31	9.52	3.988	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	20/05/2025	195.00	1.29	9.78	3.919	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	21/05/2025	199.00	1.29	9.90	4.013	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	22/05/2025	191.00	1.32	9.98	3.938	0.30
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	23/05/2025	195.00	1.31	9.95	3.923	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	24/05/2025	191.00	1.31	9.90	3.971	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	25/05/2025	198.00	1.32	9.59	3.985	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	26/05/2025	191.00	1.30	9.97	4.008	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	27/05/2025	191.00	1.32	9.76	3.981	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	28/05/2025	194.00	1.27	9.73	3.935	0.29
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	29/05/2025	200.00	1.29	9.65	4.017	0.30
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	30/05/2025	193.00	1.31	9.95	3.915	0.28
Segundo trimestre	Mes 2	mayo	31/05/2025	190.00	1.30	9.78	3.922	0.29
Promedio				193.90	1.30	9.77	3.975	0.29

Nota. Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de mayo del primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), avance por disparo, fragmentación. (P80), factor de carga y sobreexcavación del 2025.

Durante el mes de mayo del segundo trimestre del año 2025, en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos mantuvieron un comportamiento estable, evidenciando condiciones similares al mes anterior y propias de un proceso de perforación y voladura sin optimización. La producción. (TPD) osciló entre 190.00 y 200.00 toneladas por día, alcanzando un promedio de 193.90 TPD, lo que refleja una ligera variabilidad, pero sin mejoras en el rendimiento productivo. Asimismo, el avance por disparo. (M) se mantuvo en un rango de 1.27 a 1.33 m/disparo, con un promedio de 1.30 m/disparo, evidenciando una eficiencia constante pero limitada en el desarrollo de la labor minera.

En cuanto a la fragmentación. (P80), los valores se mantuvieron entre 9.50 y 10.00 pulgadas, con un promedio de 9.77 pulgadas, lo que indica una fragmentación relativamente gruesa del material volado. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) presentó un promedio de $3.975 \text{ kg}/\text{m}^3$, manteniéndose estable durante todo el periodo, pero sin generar mejoras en la calidad del proceso. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se mantuvo en 0.29, evidenciando un control limitado del contorno de la excavación. En conjunto, estos resultados confirman que el proceso operativo se mantuvo uniforme, pero sin mejoras técnicas significativas, manteniendo las mismas limitaciones en fragmentación y sobreexcavación observadas en el segundo trimestre.

Tabla 7.*Parámetros de junio 2025*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	TPD	M	P80	KG/M3	%
Segundo trimestre	Mes 3	junio	1/06/2025	196.00	1.32	9.63	3.964	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	2/06/2025	200.00	1.32	9.71	3.934	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	3/06/2025	196.00	1.33	9.91	4.004	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	4/06/2025	191.00	1.29	9.53	3.917	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	5/06/2025	199.00	1.28	9.95	4.026	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	6/06/2025	197.00	1.31	9.85	3.925	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	7/06/2025	190.00	1.32	9.64	3.963	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	8/06/2025	199.00	1.29	9.77	3.932	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	9/06/2025	194.00	1.32	9.53	3.961	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	10/06/2025	191.00	1.27	9.72	3.921	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	11/06/2025	192.00	1.28	9.92	3.986	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	12/06/2025	192.00	1.33	9.89	3.965	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	13/06/2025	197.00	1.33	9.62	3.948	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	14/06/2025	196.00	1.27	9.73	3.970	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	15/06/2025	194.00	1.29	9.60	3.995	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	16/06/2025	196.00	1.30	9.52	4.011	0.28
Segundo trimestre	Mes 3	junio	17/06/2025	195.00	1.27	9.51	3.918	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	18/06/2025	200.00	1.29	9.95	3.933	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	19/06/2025	199.00	1.33	9.93	3.916	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	20/06/2025	192.00	1.32	9.66	3.986	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	21/06/2025	191.00	1.31	9.71	3.959	0.28
Segundo trimestre	Mes 3	junio	22/06/2025	193.00	1.27	9.50	3.911	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	23/06/2025	194.00	1.30	9.55	3.967	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	24/06/2025	199.00	1.30	10.00	3.996	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	25/06/2025	191.00	1.27	9.67	3.981	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	26/06/2025	194.00	1.32	9.74	3.955	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	27/06/2025	194.00	1.29	9.69	3.933	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	28/06/2025	197.00	1.27	9.66	3.958	0.29
Segundo trimestre	Mes 3	junio	29/06/2025	196.00	1.32	9.82	3.974	0.30
Segundo trimestre	Mes 3	junio	30/06/2025	193.00	1.28	9.52	4.008	0.29
Promedio				194.93	1.32	9.71	3.961	0.29

Nota. Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de junio del primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), avance por disparo, fragmentación. (P80), factor de carga y sobreexcavación del 2025.

Durante el mes de junio del segundo trimestre del año 2025, en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos mantuvieron un comportamiento estable y consistente con los meses anteriores, reflejando un proceso de perforación y voladura sin optimización. La producción. (TPD) osciló entre 190.00 y 200.00 toneladas por día, alcanzando un promedio de 194.93 TPD, lo que evidencia la continuidad de un rendimiento productivo uniforme. Asimismo, el avance por disparo. (M) presentó valores entre 1.27 y 1.33 m/disparo, con un promedio de 1.32 m/disparo, mostrando una ligera variación, pero sin cambios significativos en la eficiencia del avance.

En cuanto a la fragmentación. (P80), los valores se mantuvieron entre 9.50 y 10.00 pulgadas, con un promedio de 9.71 pulgadas, lo que indica una fragmentación relativamente gruesa del material volado. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) presentó un promedio de $3.961 \text{ kg}/\text{m}^3$, manteniéndose constante durante el periodo, sin generar mejoras en la eficiencia del proceso. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se mantuvo en 0.29, evidenciando un control limitado del contorno de la excavación. En conjunto, los resultados del mes de junio confirman la tendencia del segundo trimestre, caracterizada por estabilidad operativa, pero sin mejoras técnicas en fragmentación, productividad ni control de la sobreexcavación.

Tabla 8.*Parámetros de julio del 2025*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	TPD	M	P80	KG/M3	%
Tercer trimestre	Mes 1	julio	1/07/2025	230.00	1.61	8.04	4.168	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	2/07/2025	235.00	1.61	7.99	4.118	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	3/07/2025	235.00	1.61	7.97	4.102	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	4/07/2025	226.00	1.62	7.83	4.202	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	5/07/2025	236.00	1.60	7.99	4.128	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	6/07/2025	236.00	1.61	8.12	4.176	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	7/07/2025	226.00	1.58	8.13	4.146	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	8/07/2025	235.00	1.64	7.81	4.200	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	9/07/2025	231.00	1.58	8.09	4.104	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	10/07/2025	227.00	1.64	8.10	4.177	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	11/07/2025	228.00	1.64	7.83	4.181	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	12/07/2025	233.00	1.64	8.13	4.115	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	13/07/2025	230.00	1.64	8.03	4.214	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	14/07/2025	235.00	1.63	7.82	4.168	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	15/07/2025	236.00	1.59	8.05	4.200	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	16/07/2025	235.00	1.61	8.10	4.135	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	17/07/2025	232.00	1.59	8.14	4.191	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	18/07/2025	233.00	1.63	7.79	4.123	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	19/07/2025	233.00	1.65	7.95	4.142	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	20/07/2025	226.00	1.60	8.11	4.149	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	21/07/2025	236.00	1.58	8.01	4.104	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	22/07/2025	230.00	1.64	7.98	4.187	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	23/07/2025	230.00	1.58	7.98	4.204	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	24/07/2025	230.00	1.58	7.85	4.137	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	25/07/2025	228.00	1.64	7.85	4.161	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	26/07/2025	230.00	1.58	7.77	4.208	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	27/07/2025	236.00	1.60	8.07	4.142	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	28/07/2025	234.00	1.60	8.14	4.105	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	29/07/2025	229.00	1.58	7.84	4.204	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	30/07/2025	227.00	1.63	7.96	4.114	0.16
Tercer trimestre	Mes 1	julio	31/07/2025	228.00	1.63	7.83	4.218	0.16
Promedio				231.48	1.59	7.98	4.159	0.16

Nota. Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de julio del primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), avance por disparo, fragmentación. (P80), factor de carga y sobreexcavación del 2025.

Durante el mes de julio del tercer trimestre del año 2025, en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos evidenciaron una mejora significativa como resultado de la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura. La producción. (TPD) presentó valores entre 226.00 y 236.00 toneladas por día, alcanzando un promedio de 231.48 TPD, lo que refleja un incremento notable en el rendimiento productivo respecto al periodo sin mejora. Asimismo, el avance por disparo. (M) osciló entre 1.58 y 1.65 m/disparo, con un promedio de 1.59 m/disparo, evidenciando una mayor eficiencia en el desarrollo de la labor minera.

En cuanto a la fragmentación. (P80), los valores se mantuvieron en un rango de 7.77 a 8.14 pulgadas, con un promedio de 7.98 pulgadas, lo que indica una fragmentación más fina y uniforme del material volado. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) presentó un promedio de $4.159 \text{ kg}/\text{m}^3$, mostrando una adecuada distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se mantuvo constante en 0.16, evidenciando un control eficiente del contorno de la excavación. En conjunto, estos resultados demuestran que la optimización del diseño de voladura permitió mejorar significativamente la productividad, la calidad de fragmentación y la reducción de la sobreexcavación desde el inicio del tercer trimestre

Tabla 9.*Parámetros de agosto del 2025*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	TPD	M	P80	KG/M3	%
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	1/08/2025	236.00	1.60	8.12	4.222	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	2/08/2025	229.00	1.58	7.90	4.204	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	3/08/2025	228.00	1.63	7.95	4.145	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	4/08/2025	232.00	1.65	7.78	4.145	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	5/08/2025	233.00	1.61	8.08	4.193	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	6/08/2025	235.00	1.58	7.89	4.206	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	7/08/2025	232.00	1.65	7.99	4.134	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	8/08/2025	228.00	1.60	7.90	4.118	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	9/08/2025	232.00	1.59	8.00	4.187	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	10/08/2025	232.00	1.65	7.98	4.145	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	11/08/2025	230.00	1.61	8.03	4.216	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	12/08/2025	236.00	1.58	7.94	4.151	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	13/08/2025	236.00	1.58	8.10	4.185	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	14/08/2025	230.00	1.63	7.85	4.197	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	15/08/2025	227.00	1.61	7.77	4.110	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	16/08/2025	235.00	1.59	7.91	4.175	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	17/08/2025	231.00	1.59	7.92	4.104	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	18/08/2025	231.00	1.64	8.09	4.109	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	19/08/2025	233.00	1.60	7.94	4.214	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	20/08/2025	225.00	1.61	7.80	4.156	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	21/08/2025	231.00	1.65	8.14	4.210	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	22/08/2025	235.00	1.59	7.79	4.221	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	23/08/2025	229.00	1.58	8.11	4.159	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	24/08/2025	226.00	1.61	8.00	4.139	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	25/08/2025	231.00	1.62	7.82	4.119	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	26/08/2025	231.00	1.59	7.86	4.110	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	27/08/2025	227.00	1.61	7.99	4.206	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	28/08/2025	231.00	1.61	7.86	4.165	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	29/08/2025	226.00	1.61	8.05	4.122	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	30/08/2025	235.00	1.58	7.92	4.193	0.16
Tercer trimestre	Mes 2	agosto	31/08/2025	236.00	1.60	8.11	4.152	0.16
Promedio				231.26	1.60	7.95	4.165	0.16

Nota. Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de agosto del primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), avance por disparo, fragmentación. (P80), factor de carga y sobreexcavación del 2025.

Durante el mes de agosto del tercer trimestre del año 2025, en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos mantuvieron un comportamiento altamente eficiente y consistente, consolidando los resultados obtenidos tras la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura. La producción. (TPD) osciló entre 225.00 y 236.00 toneladas por día, alcanzando un promedio de 231.26 TPD, lo que evidencia la estabilidad del incremento productivo logrado. Asimismo, el avance por disparo. (M) se mantuvo en un rango de 1.58 a 1.65 m/disparo, con un promedio de 1.60 m/disparo, reflejando una mejora sostenida en el rendimiento del avance de la labor minera.

En cuanto a la fragmentación. (P80), los valores se situaron entre 7.77 y 8.14 pulgadas, con un promedio de 7.95 pulgadas, evidenciando una fragmentación fina y uniforme del material volado. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) presentó un promedio de 4.165 kg/m^3 , ligeramente superior al mes anterior, lo que indica una adecuada dosificación de explosivo para lograr una mejor liberación de energía en el macizo rocoso. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se mantuvo constante en 0.16, confirmando un adecuado control del contorno de la excavación. En conjunto, los resultados del mes de agosto ratifican la eficiencia del diseño optimizado de voladura, manteniendo altos niveles de productividad, mejorando la fragmentación y reduciendo significativamente la sobreexcavación.

Tabla 10.*Parámetros de septiembre del 2025*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	TPD	M	P80	KG/M3	%
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	1/09/2025	235.00	1.59	7.94	4.188	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	2/09/2025	236.00	1.61	8.13	4.117	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	3/09/2025	232.00	1.58	7.79	4.134	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	4/09/2025	229.00	1.64	7.81	4.192	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	5/09/2025	225.00	1.62	8.10	4.108	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	6/09/2025	230.00	1.64	8.09	4.211	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	7/09/2025	231.00	1.62	7.87	4.194	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	8/09/2025	231.00	1.64	7.95	4.191	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	9/09/2025	236.00	1.58	7.91	4.118	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	10/09/2025	229.00	1.63	8.00	4.152	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	11/09/2025	227.00	1.64	8.05	4.124	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	12/09/2025	225.00	1.58	7.84	4.128	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	13/09/2025	225.00	1.61	8.06	4.126	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	14/09/2025	231.00	1.63	8.12	4.127	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	15/09/2025	232.00	1.64	7.78	4.110	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	16/09/2025	236.00	1.61	8.14	4.127	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	17/09/2025	236.00	1.63	7.89	4.108	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	18/09/2025	235.00	1.58	8.14	4.134	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	19/09/2025	225.00	1.58	7.96	4.207	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	20/09/2025	225.00	1.60	7.85	4.189	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	21/09/2025	235.00	1.64	7.77	4.107	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	22/09/2025	230.00	1.62	8.04	4.189	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	23/09/2025	229.00	1.60	8.05	4.182	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	24/09/2025	235.00	1.62	7.83	4.179	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	25/09/2025	227.00	1.60	8.06	4.192	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	26/09/2025	236.00	1.65	7.99	4.205	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	27/09/2025	231.00	1.63	7.96	4.136	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	28/09/2025	231.00	1.58	7.98	4.123	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	29/09/2025	230.00	1.59	8.01	4.137	0.16
Tercer trimestre	Mes 3	septiembre	30/09/2025	230.00	1.58	8.03	4.129	0.16
Promedio				230.83	1.63	7.97	4.152	0.16

Nota. Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de septiembre del

primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), avance por disparo, fragmentación. (P80),

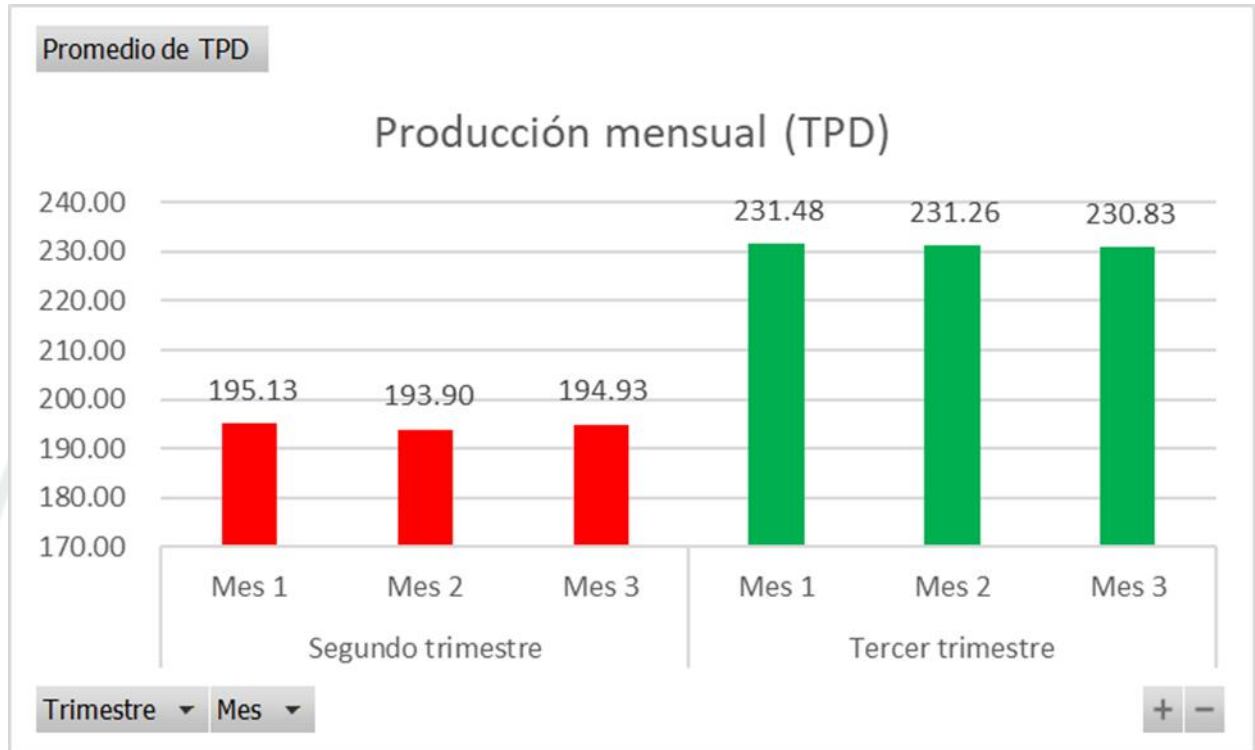
factor de carga y sobreexcavación del 2025.

Durante el mes de septiembre del tercer trimestre del año 2025, en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral, los indicadores operativos mantuvieron un desempeño eficiente y consistente, consolidando los resultados obtenidos con la implementación del diseño optimizado de perforación y voladura. La producción. (TPD) osciló entre 225.00 y 236.00 toneladas por día, alcanzando un promedio de 230.83 TPD, lo que evidencia la sostenibilidad del incremento productivo logrado durante todo el trimestre. Asimismo, el avance por disparo. (M) se mantuvo en un rango de 1.58 a 1.65 m/disparo, con un promedio de 1.63 m/disparo, representando el valor más alto del trimestre y confirmando la mejora en el rendimiento del avance de la labor minera.

En cuanto a la fragmentación. (P80), los valores se mantuvieron entre 7.77 y 8.14 pulgadas, con un promedio de 7.97 pulgadas, evidenciando una fragmentación fina y uniforme del material volado. Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) presentó un promedio de 4.152 kg/m^3 , ligeramente menor que el mes anterior, pero manteniendo una adecuada distribución de la energía explosiva. Finalmente, el porcentaje de sobreexcavación. (%) se mantuvo constante en 0.16, lo que confirma un control óptimo del contorno de la excavación. En conjunto, los resultados del mes de septiembre ratifican la efectividad del diseño de voladura optimizado, logrando mantener altos niveles de productividad, mejorar la calidad de fragmentación y reducir significativamente la sobreexcavación en la operación minera.

Figura 12.

Producción mensual



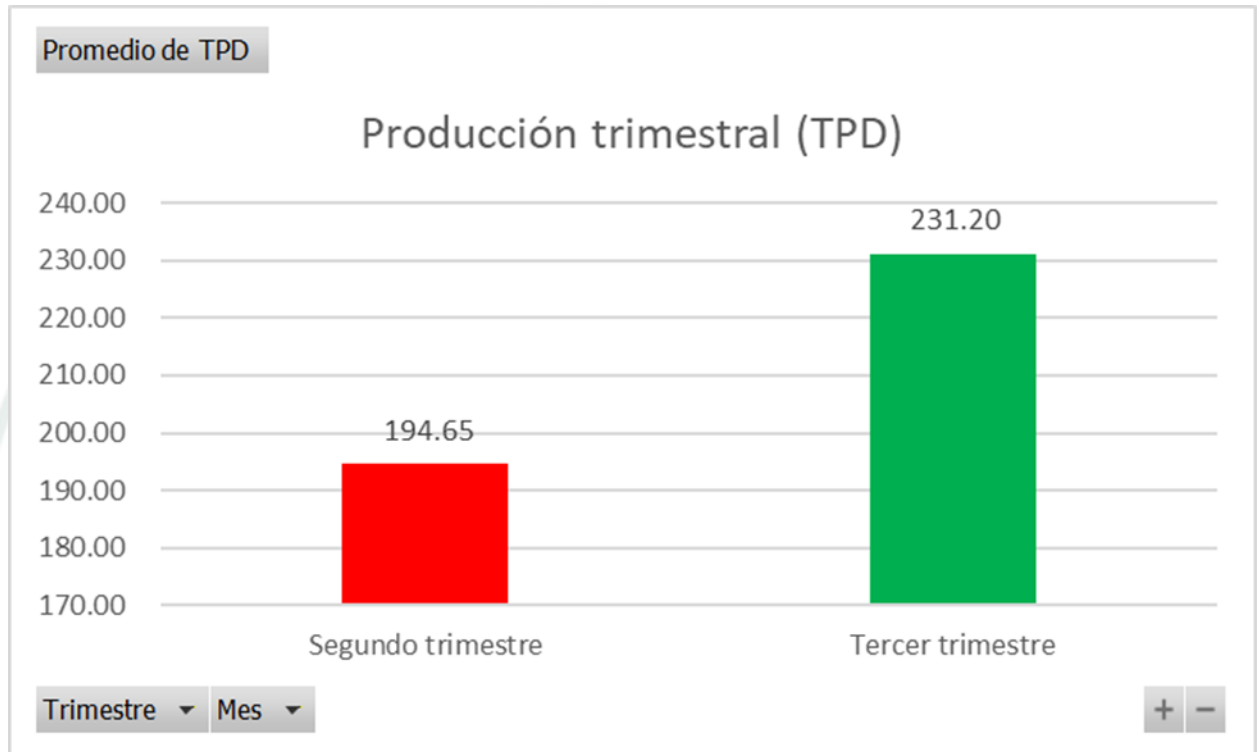
Nota. El gráfico compara los promedios mensuales de producción entre el primer y segundo trimestre del 2025, evidenciando un incremento sostenido de la producción del 2025.

El gráfico de producción mensual. (TPD) evidencia una mejora clara y sostenida entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. Durante el segundo trimestre, los valores se mantuvieron relativamente estables en 195.13, 193.90 y 194.93 TPD, reflejando un comportamiento sin optimización; sin embargo, en el tercer trimestre se observa un incremento significativo, alcanzando 231.48, 231.26 y 230.83 TPD, lo que representa un aumento aproximado del 18.77 % en la producción. Este comportamiento confirma que la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura permitió mejorar de manera efectiva el rendimiento productivo, logrando una mayor

eficiencia en el avance y un mejor aprovechamiento del proceso de voladura.

Figura 13.

Producción trimestral



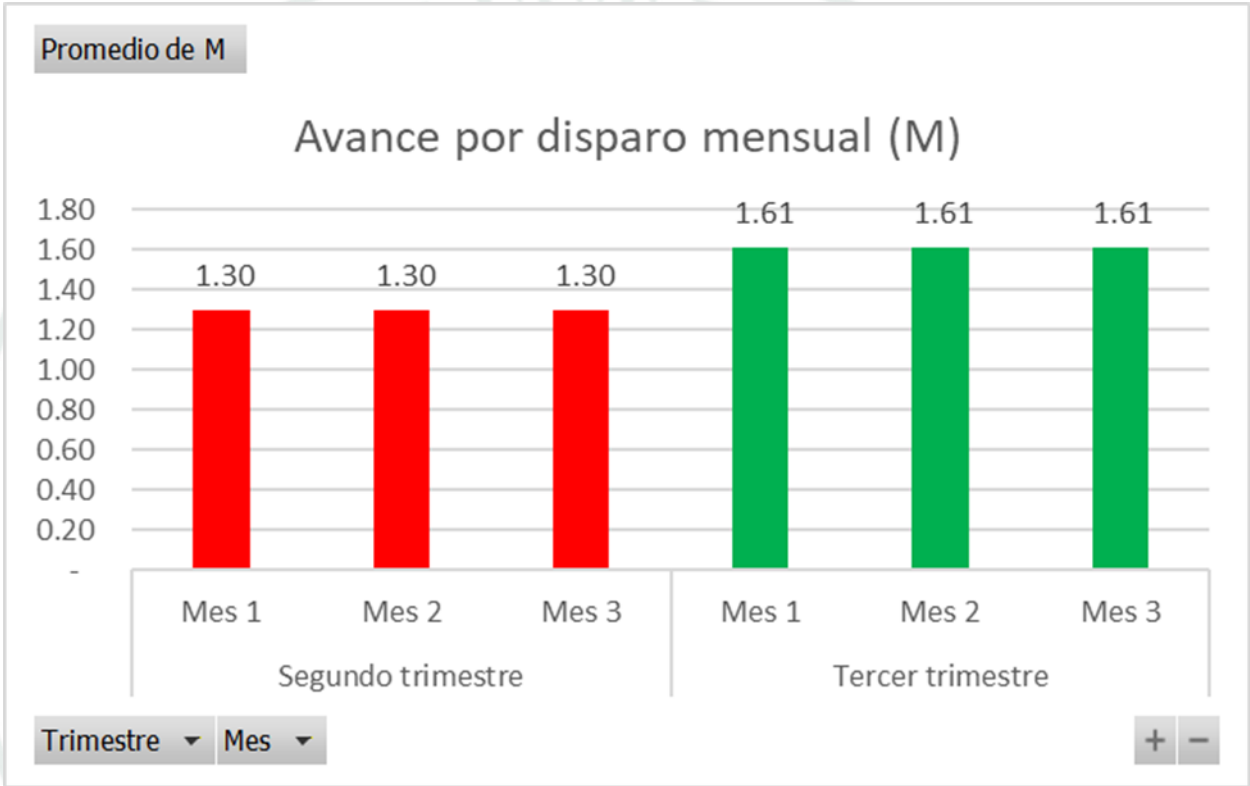
Nota. El gráfico muestra el promedio total de producción por día, TPD de ambos trimestres del 2025.

El gráfico de producción trimestral. (TPD) muestra una mejora significativa en el rendimiento operativo entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. En el segundo trimestre se registró una producción promedio de 194.65 TPD, mientras que en el tercer trimestre este valor se incrementó a 231.20 TPD, lo que representa un aumento aproximado del 18.77 %. Este incremento evidencia que la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura tuvo un impacto positivo en la productividad, permitiendo un mayor aprovechamiento de la energía explosiva, una

mejor fragmentación del material y, en consecuencia, un incremento sostenido en la eficiencia del proceso de minado.

Figura 14.

Avance por disparo mensual



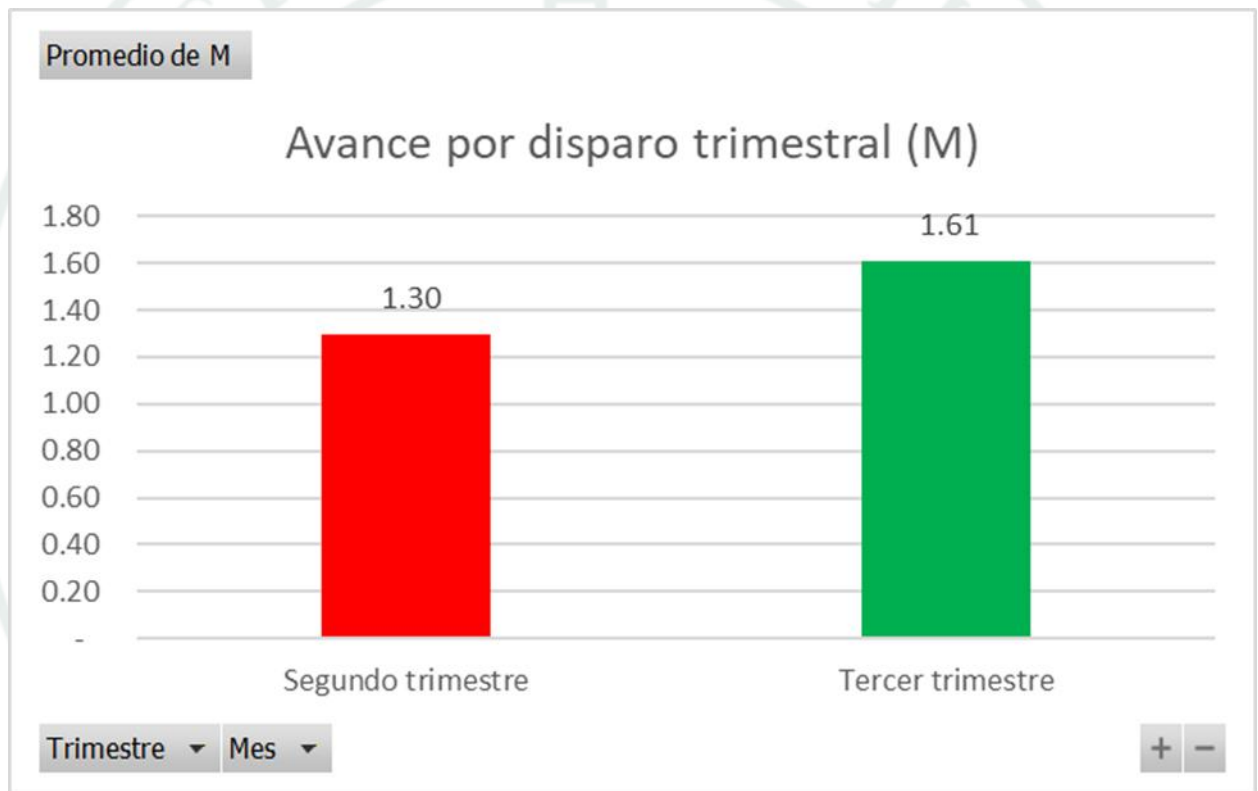
Nota. El gráfico muestra la comparación mensual del tiempo promedio de avance por disparo entre ambos trimestres del 2025.

El gráfico de avance por disparo mensual. (M) evidencia una mejora significativa y sostenida entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. Durante el segundo trimestre, el avance se mantuvo constante en 1.30 m/disparo, reflejando un desempeño sin optimización; sin embargo, en el tercer trimestre se incrementó a 1.61 m/disparo en los tres meses evaluados, lo que representa una mejora

aproximada del 24 %. Este incremento demuestra que la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura permitió aprovechar de manera más eficiente la longitud efectiva de perforación, generando un mayor avance por disparo y contribuyendo directamente al incremento de la productividad del proceso de minado

Figura 15.

Avance por disparo trimestral



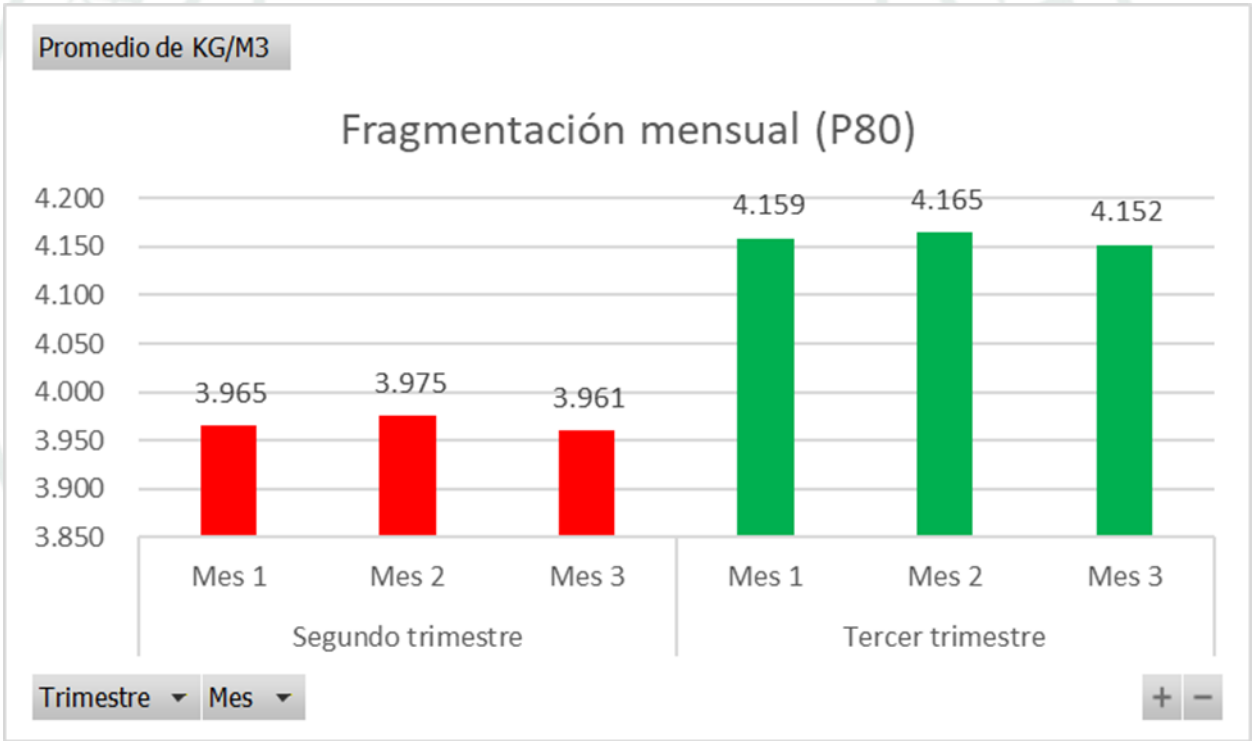
Nota. El gráfico presenta el tiempo promedio total del avance por disparo en ambos trimestres del 2025.

El gráfico de avance por disparo trimestral. (M) evidencia una mejora significativa en el rendimiento del proceso de voladura entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. En el segundo trimestre se registró un

avance promedio de 1.30 m/disparo, mientras que en el tercer trimestre este valor se incrementó a 1.61 m/disparo, lo que representa una mejora aproximada del 24 %. Este incremento confirma que la implementación de la malla optimizada permitió un mejor aprovechamiento de la longitud efectiva de perforación y una mayor eficiencia en la liberación de energía explosiva, contribuyendo directamente al aumento de la productividad del avance en la labor minera.

Figura 16.

Fragmentación mensual



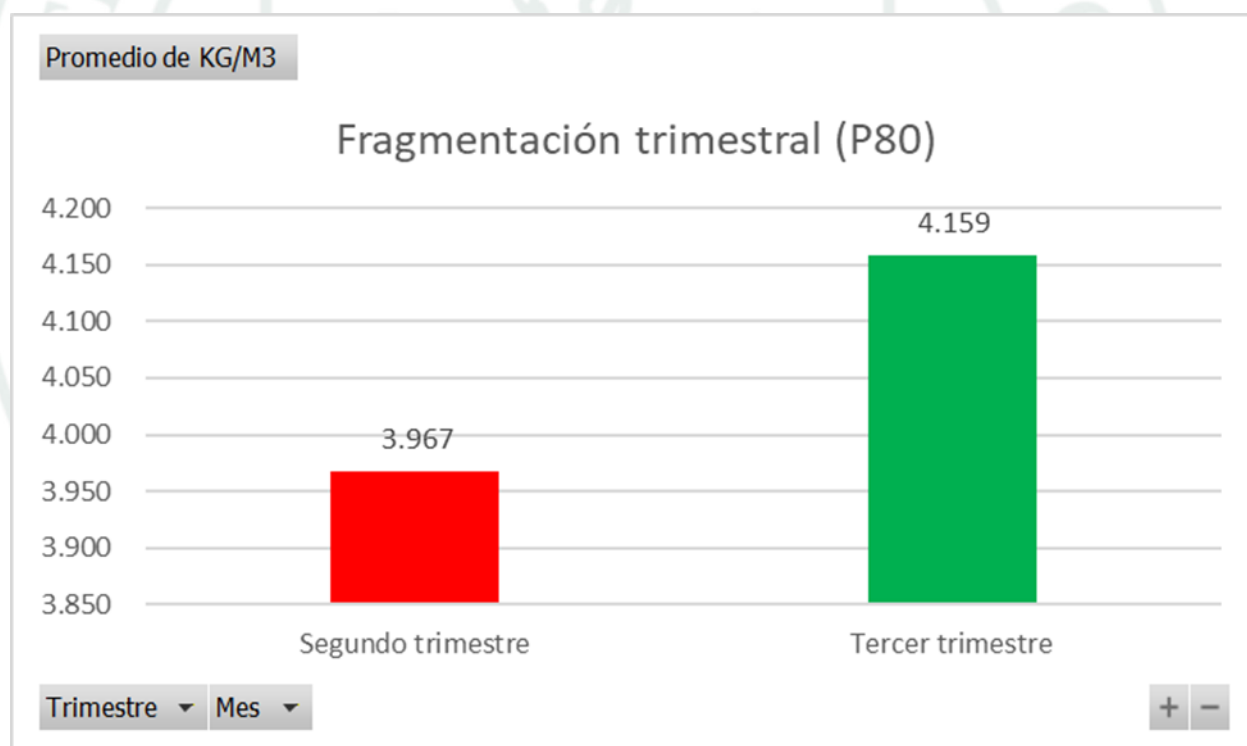
Nota. El gráfico compara el tamaño característico P80 en ambos trimestres, evidenciando una reducción continua durante el segundo trimestre del 2025.

El gráfico presentado, correspondiente al factor de carga. (kg/m³), evidencia un incremento en la dosificación de explosivo entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en

la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. Durante el segundo trimestre, los valores se mantuvieron en 3.965, 3.975 y 3.961 kg/m³, mientras que en el tercer trimestre se incrementaron a 4.159, 4.165 y 4.152 kg/m³, lo que representa un aumento aproximado del 4.83 %. Este incremento en el factor de carga permitió una mejor liberación de energía explosiva en el macizo rocoso, contribuyendo a obtener una fragmentación más adecuada y uniforme, lo cual se refleja en la reducción del P80 y en la mejora de la eficiencia del proceso de carguío y avance

Figura 17.

Fragmentación trimestral



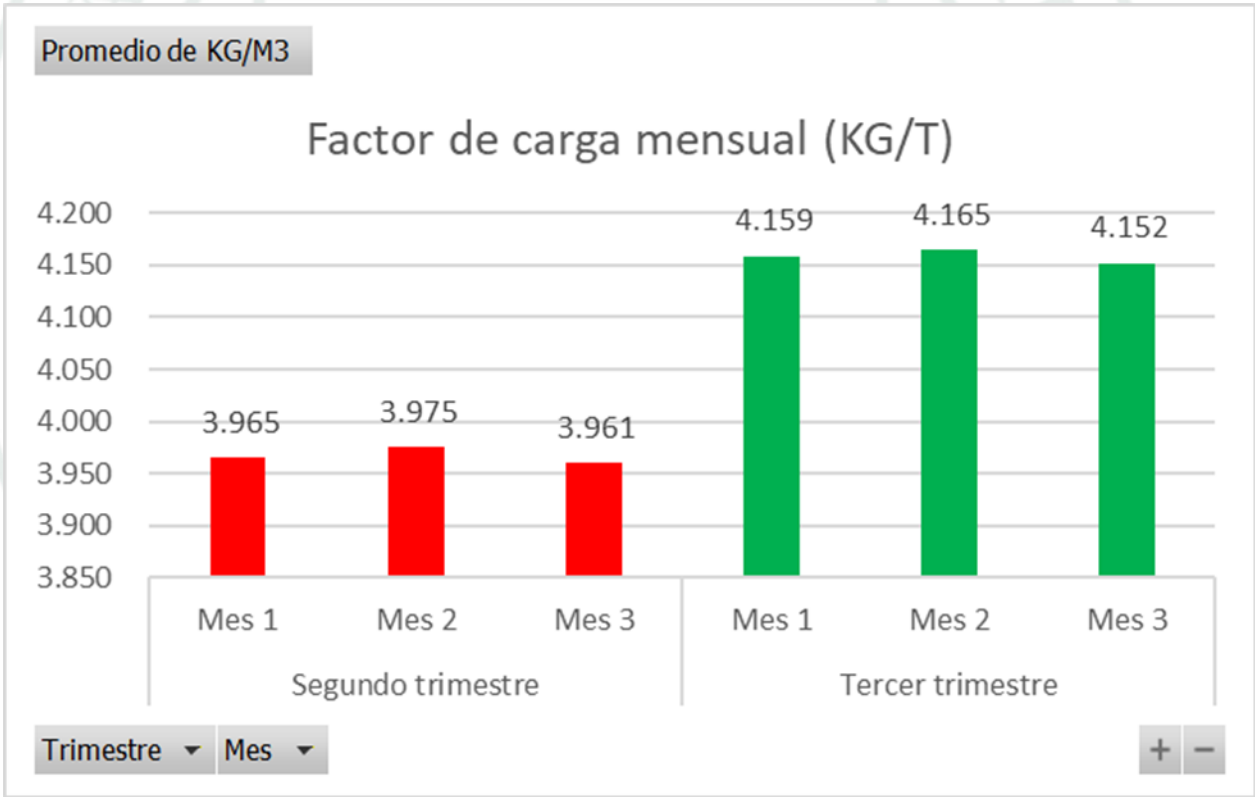
Nota. El gráfico muestra el P80 promedio total de ambos trimestres del 2025.

El gráfico de factor de carga trimestral. (kg/m³) muestra un incremento en la dosificación de explosivo entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30

del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. En el segundo trimestre se registró un valor promedio de 3.967 kg/m³, mientras que en el tercer trimestre este aumentó a 4.159 kg/m³, lo que representa una mejora aproximada del 4.83 %. Este incremento permitió una mejor distribución y liberación de la energía explosiva en el macizo rocoso, lo cual contribuyó a obtener una fragmentación más eficiente, evidenciada en la reducción del P80, y a mejorar el rendimiento del proceso de voladura y avance en la operación minera

Figura 18.

Factor de carga mensual



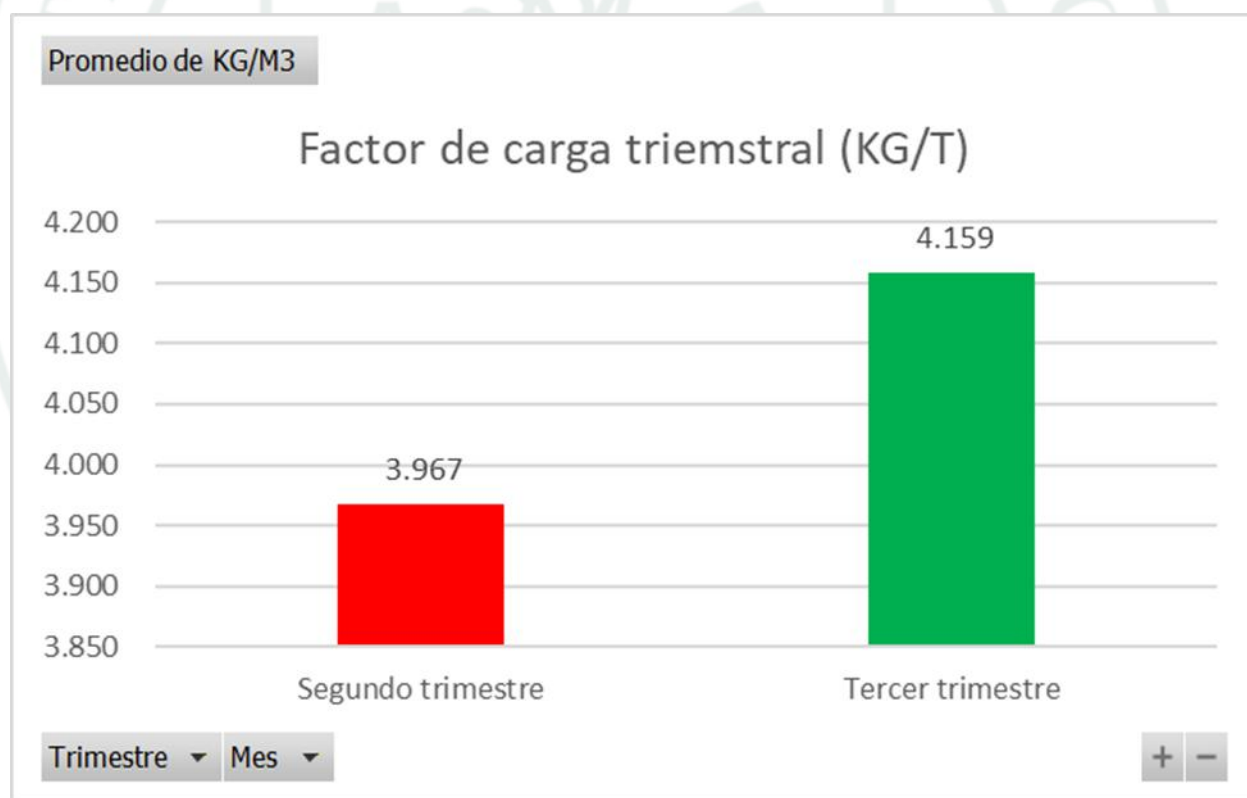
Nota. El gráfico compara el factor de carga mensual entre ambos trimestres del 2025.

El gráfico de factor de carga mensual. (kg/m³) evidencia un incremento sostenido en la dosificación de explosivo entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30

del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. Durante el segundo trimestre, los valores se mantuvieron en 3.965, 3.975 y 3.961 kg/m³, mientras que en el tercer trimestre se elevaron a 4.159, 4.165 y 4.152 kg/m³, lo que representa un aumento aproximado del 4.83 %. Este incremento permitió una mejor liberación de energía en el macizo rocoso, favoreciendo una fragmentación más uniforme y eficiente, lo cual contribuyó directamente a la mejora del avance por disparo, al incremento de la productividad y a un mejor control del proceso de voladura.

Figura 19.

Factor de carga trimestral



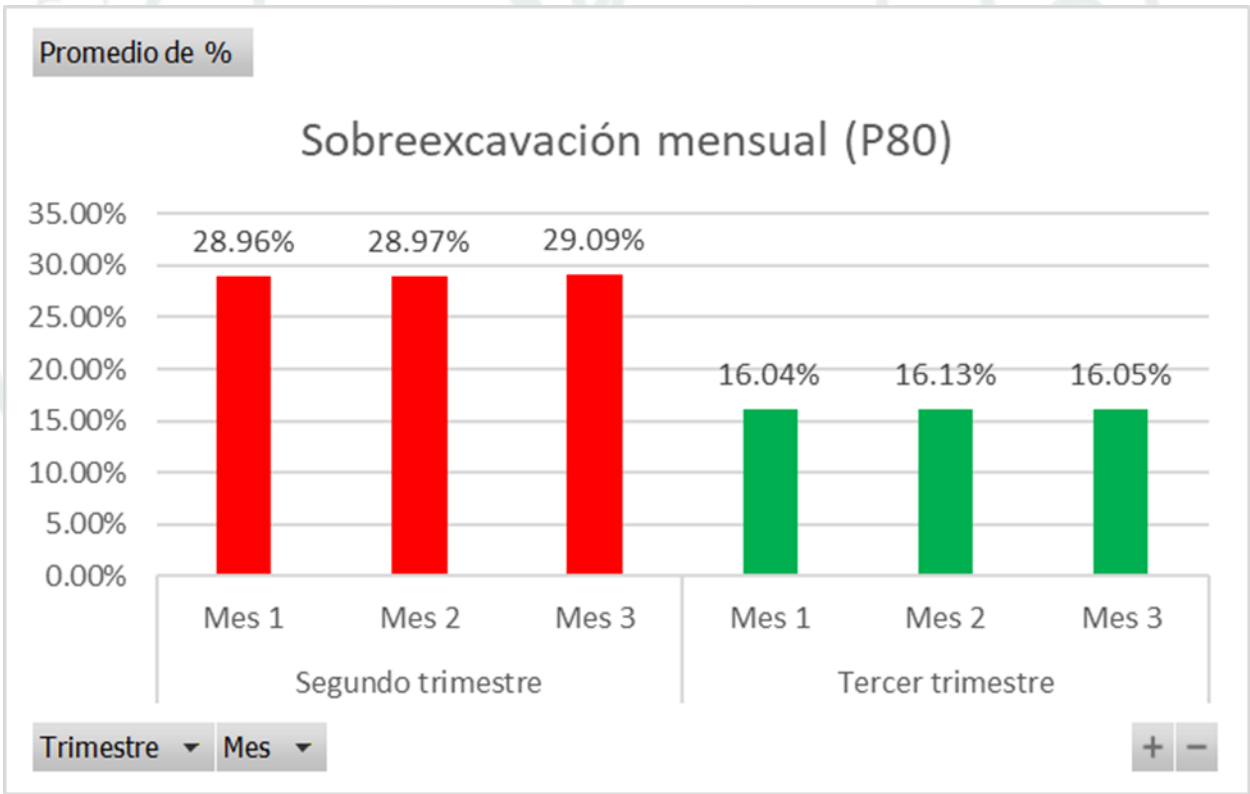
Nota. El gráfico presenta el factor de carga promedio total para ambos trimestres del 2025.

El gráfico de factor de carga trimestral. (kg/m³) evidencia un incremento en la

dosificación de explosivo entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. En el segundo trimestre se registró un valor promedio de 3.967 kg/m³, mientras que en el tercer trimestre este aumentó a 4.159 kg/m³, representando una mejora aproximada del 4.83 %. Este incremento permitió una mejor distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso, favoreciendo una fragmentación más eficiente y uniforme, lo cual contribuyó directamente a la reducción del P80, al incremento del avance por disparo y a la mejora sostenida de la productividad en la operación minera

Figura 20.

Costo unitario de producción mensual

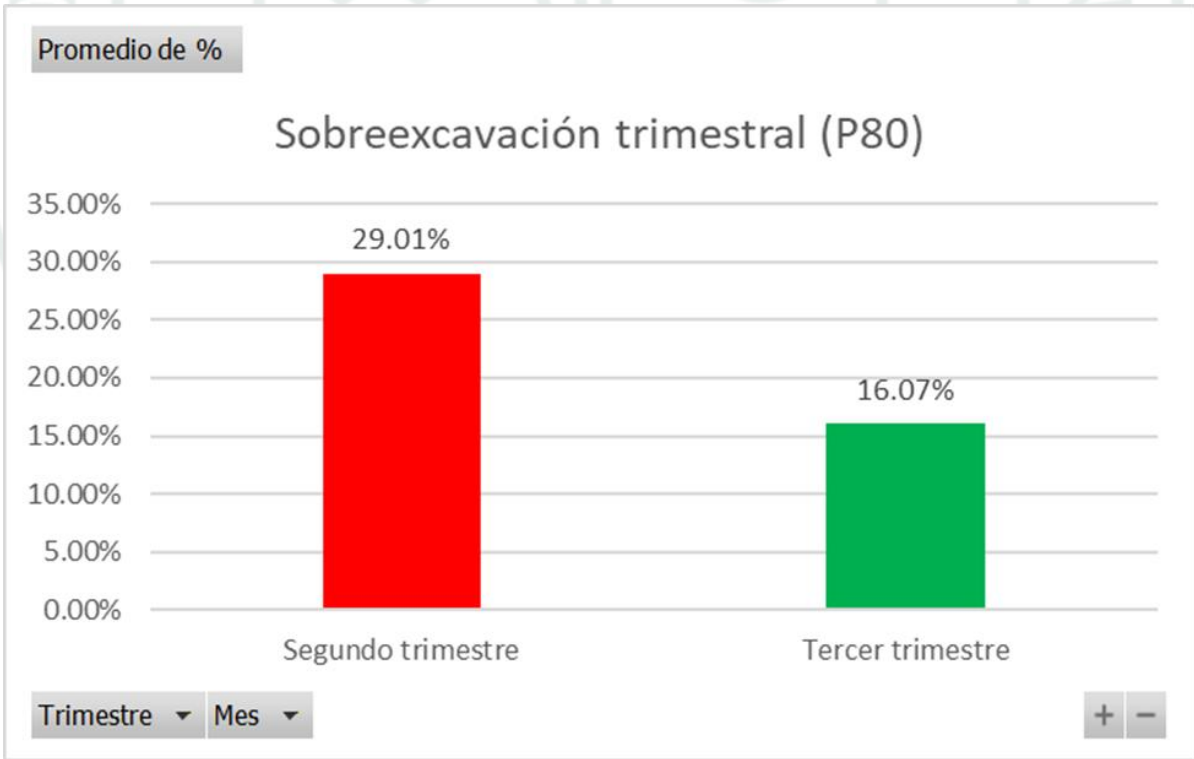


Nota. El gráfico compara la sobreexcavación mensual entre ambos trimestres del 2025.

El gráfico de sobreexcavación mensual. (%) evidencia una reducción significativa entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. Durante el segundo trimestre, los valores se mantuvieron en 28.96 %, 28.97 % y 29.09 %, reflejando un control limitado del contorno de la excavación; sin embargo, en el tercer trimestre estos valores disminuyeron considerablemente a 16.04 %, 16.13 % y 16.05 %, lo que representa una reducción aproximada del 44.60 %. Esta mejora demuestra que la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura permitió un mejor control de la energía explosiva y del contorno excavado, reduciendo el daño al macizo rocoso y contribuyendo a una operación más eficiente y segura.

Figura 21.

Sobreexcavación trimestral



Nota. El gráfico muestra la sobreexcavación entre ambos trimestres del 2025.

El gráfico de sobreexcavación trimestral. (%) evidencia una reducción significativa en el daño al contorno de la excavación entre el segundo y tercer trimestre del año 2025 en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. En el segundo trimestre se registró un valor promedio de 29.01 %, mientras que en el tercer trimestre este disminuyó a 16.07 %, lo que representa una reducción aproximada del 44.60 %. Este resultado confirma que la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura permitió un mejor control de la energía explosiva, reduciendo la sobre rotura del macizo rocoso y mejorando la estabilidad de la labor, lo cual contribuye directamente a una operación más eficiente, segura y técnicamente controlada.

4.6. Resultados

Los resultados obtenidos en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral durante el año 2025 evidenciaron una mejora sustancial en el desempeño operativo tras la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura en el tercer trimestre. En el segundo trimestre, correspondiente al periodo sin mejora, los indicadores mostraron un comportamiento estable pero limitado, caracterizado por una fragmentación relativamente gruesa, niveles elevados de sobreexcavación y una productividad sin incrementos significativos. Sin embargo, a partir de la aplicación del rediseño de la malla, sustentado en criterios técnicos como el modelo de Holmberg-Persson y la estimación de fragmentación mediante Kuz-Ram, se logró un cambio significativo en la eficiencia del proceso de voladura.

En términos de producción. (TPD), se registró un incremento de 194.65 a 231.20 toneladas por día, lo que representa una mejora del 18.77 %, evidenciando un mayor aprovechamiento del ciclo de minado. Este incremento se encuentra directamente relacionado con la mejora en el avance por disparo, que pasó de 1.30 m/disparo en el segundo trimestre a

1.61 m/disparo en el tercer trimestre, logrando una mejora del 24 %. Este resultado indica que la energía explosiva fue mejor distribuida y que la longitud efectiva de perforación fue utilizada de manera más eficiente, permitiendo un mayor rendimiento en cada disparo realizado.

Por otro lado, la fragmentación del material volado. (P80) mostró una reducción significativa, pasando de 9.76 pulgadas en el segundo trimestre a 7.97 pulgadas en el tercer trimestre, lo que representa una mejora del 18.38 %. Esta disminución del tamaño de fragmentación indica que el material obtenido fue más fino y uniforme, lo cual favoreció directamente las operaciones posteriores de carguío, transporte y procesamiento. Esta mejora se encuentra respaldada por la aplicación del modelo Kuz-Ram, cuyos resultados teóricos fueron consistentes con los valores medidos mediante el software Split Desktop, evidenciando la validez del diseño implementado.

Asimismo, el factor de carga. (kg/m^3) se incrementó de 3.967 a 4.159 kg/m^3 , representando una mejora del 4.83 %, lo que permitió una mayor liberación de energía en el macizo rocoso. Este incremento no solo contribuyó a mejorar la fragmentación, sino también a optimizar el proceso de ruptura del macizo, reduciendo zonas de roca sobredimensionada y mejorando la eficiencia global de la voladura. Es importante destacar que este aumento fue controlado y técnicamente justificado, evitando efectos negativos como el incremento de la sobreexcavación.

En este sentido, uno de los resultados más relevantes fue la reducción del porcentaje de sobreexcavación, que pasó de 29.01 % en el segundo trimestre a 16.07 % en el tercer trimestre, lo que representa una disminución del 44.60 %. Este resultado evidencia un mejor control del contorno de la excavación, atribuible a la adecuada distribución de los taladros de

contorno, el uso de técnicas de carguío más eficientes y la correcta aplicación de los parámetros de diseño. La reducción de la sobreexcavación implica una menor dilución, mayor estabilidad de la labor y menores costos asociados a sostenimiento y limpieza.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la optimización del diseño de perforación y voladura tuvo un impacto positivo y significativo en todos los indicadores evaluados. La mejora simultánea en productividad, fragmentación, eficiencia del avance y control de sobreexcavación valida la efectividad de la propuesta técnica planteada en la investigación. Estos resultados no solo confirman el cumplimiento de los objetivos, sino que también evidencian que la aplicación de herramientas de diseño y modelamiento como Holmberg-Persson, Kuz-Ram, JKSimBlast y Split Desktop constituye una estrategia efectiva para la mejora continua de los procesos de explotación en minería subterránea.

Tabla 11.

Comparativo de resultados: Segundo vs Tercer trimestre

Indicador	Segundo trimestre	Tercer trimestre	Variación. (%)
Producción. (TPD)	194.65	231.2	18.77%
Avance. (m/disparo)	1.30	1.61	24.00%
Fragmentación. (P80)	9.76	7.97	-18.38%
Factor de carga. (kg/m ³)	3.967	4.159	4.83%
Sobreexcavación. (%)	29.01%	16.07%	-44.60%

Nota. Se muestra los resultados del segundo vs tercer trimestre del 2025.

4.7. Análisis

El análisis de los resultados generales en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral permitió evaluar el comportamiento de los principales indicadores operativos antes y después de la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura durante el año 2025. En el segundo trimestre, correspondiente al periodo sin mejora, se observó un desempeño estable pero limitado, caracterizado por una fragmentación relativamente gruesa, un control deficiente de la sobreexcavación y una productividad que no presentó incrementos significativos. En contraste, en el tercer trimestre, tras la aplicación del rediseño basado en criterios técnicos como los modelos de Holmberg-Persson y Kuz-Ram, se evidenció una mejora sustancial en todos los indicadores evaluados.

En términos de productividad. (TPD), se registró un incremento de 194.65 a 231.20 toneladas por día, lo que representa una mejora del 18.77 %, lo cual demuestra un mayor aprovechamiento del proceso de voladura y una optimización del ciclo de minado. Este incremento estuvo directamente relacionado con el aumento del avance por disparo, que pasó de 1.30 m/disparo a 1.61 m/disparo, equivalente a una mejora del 24 %, evidenciando una mayor eficiencia en el uso de la longitud efectiva de perforación y una mejor respuesta del macizo rocoso frente a la energía explosiva aplicada.

Asimismo, la fragmentación del material volado. (P80) presentó una reducción significativa, pasando de 9.76 pulgadas en el segundo trimestre a 7.97 pulgadas en el tercer trimestre, lo que representa una mejora del 18.38 %. Este resultado indica que el material obtenido fue más fino y uniforme, lo que favoreció las operaciones de carguío, redujo la necesidad de retrabajos y mejoró la eficiencia del transporte. Esta mejora en la fragmentación se encuentra directamente asociada a la adecuada aplicación del modelo Kuz-Ram, cuyos

resultados fueron coherentes con las mediciones realizadas mediante el software Split Desktop, validando la precisión del diseño implementado.

Por otro lado, el factor de carga. (kg/m^3) se incrementó de 3.967 a 4.159 kg/m^3 , lo que representa una mejora del 4.83 %, permitiendo una mejor liberación de energía en el macizo rocoso. Este incremento fue determinante para lograr una fragmentación más eficiente sin generar efectos adversos en el contorno de la excavación. En este sentido, uno de los resultados más relevantes fue la reducción de la sobreexcavación, que pasó de 29.01 % a 16.07 %, representando una disminución del 44.60 %, lo cual evidencia un mejor control de la geometría de la labor y una reducción del daño al macizo rocoso circundante.

En conjunto, el análisis de los resultados generales demuestra que la implementación de la malla optimizada de perforación y voladura tuvo un impacto positivo y significativo en la operación minera. La mejora simultánea en productividad, fragmentación, eficiencia del avance y control de sobreexcavación confirma la efectividad del rediseño aplicado. Estos resultados validan el cumplimiento de los objetivos planteados y evidencian que la aplicación de herramientas técnicas y modelos matemáticos constituye una estrategia efectiva para la optimización de procesos en minería subterránea.

4.8. Discusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación guardan coherencia con lo planteado por diversos autores y tesis en el ámbito de la optimización de la perforación y voladura en minería subterránea. En relación con la fragmentación del material volado, los resultados del tercer trimestre evidenciaron una reducción del P80 de 9.76 a 7.97 pulgadas, lo cual coincide con lo señalado por Kuznetsov. (1973) y desarrollado en el modelo Kuz-Ram, quienes establecen que una adecuada relación entre el volumen de roca y la carga explosiva

permite obtener una fragmentación más fina y uniforme. Asimismo, los resultados obtenidos fueron consistentes con lo indicado por Cunningham. (1983), quien sostiene que el control de los parámetros de diseño de voladura influye directamente en la distribución granulométrica del material, lo cual se validó mediante el uso del software Split Desktop en esta investigación.

En cuanto al control de la sobreexcavación, los resultados evidenciaron una reducción significativa del 29.01 % al 16.07 %, lo que concuerda con lo propuesto por Persson, Holmberg y Lee. (1994), quienes señalan que la correcta aplicación del diseño de taladros de contorno mediante el modelo de Holmberg-Persson permite minimizar el daño al macizo rocoso y mejorar la estabilidad de la excavación. Estos resultados también coinciden con lo reportado por Orbezo. (2024), quien concluyó que una adecuada distribución de burden y espaciamiento reduce la sobre rotura y mejora el control geométrico de la labor minera, lo cual fue evidenciado en la presente investigación.

Respecto a la productividad del avance, los resultados mostraron un incremento del avance por disparo de 1.30 a 1.61 m/disparo y un aumento de la producción de 194.65 a 231.20 TPD, lo que guarda relación con lo señalado por Hustrulid y Bullock. (2001), quienes indican que la optimización del diseño de voladura permite mejorar la eficiencia del ciclo de minado y aumentar la productividad. Asimismo, estos resultados son consistentes con lo reportado por Huerta. (2023) y Porta. (2025), quienes concluyeron que la mejora en los parámetros de perforación y voladura influye directamente en el incremento de la producción y en la eficiencia operativa en minería subterránea.

En términos generales, los resultados de la presente investigación no solo coinciden con los fundamentos teóricos establecidos por los autores clásicos, sino que también se alinean con estudios recientes desarrollados en condiciones similares. Esto demuestra que la

aplicación de modelos como Holmberg-Persson y Kuz-Ram, junto con herramientas de simulación y medición como JKSimBlast y Split Desktop, constituye una metodología válida y efectiva para la optimización del proceso de voladura en minería subterránea, contribuyendo al mejoramiento de la productividad y al control de la sobreexcavación en operaciones mineras.

4.9. Contrastación de Hipótesis

La contrastación de hipótesis se realizó mediante el análisis comparativo de los resultados obtenidos en el segundo trimestre de 2025, correspondiente al periodo sin mejora, y el tercer trimestre de 2025, correspondiente al periodo con implementación de la malla optimizada de perforación y voladura en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral. Para ello se evaluaron los indicadores de producción. (TPD), avance por disparo. (M), fragmentación. (P80), factor de carga. (kg/m^3) y sobreexcavación. (%), los cuales permitieron verificar el efecto de la mejora aplicada sobre la eficiencia del proceso de voladura.

En términos generales, los resultados mostraron que la implementación de la mejora produjo cambios favorables en todos los indicadores evaluados. La producción se incrementó de 194.65 TPD a 231.20 TPD, el avance por disparo aumentó de 1.30 m/disparo a 1.61 m/disparo, la fragmentación P80 se redujo de 9.76 pulgadas a 7.97 pulgadas, el factor de carga pasó de $3.967 \text{ kg}/\text{m}^3$ a $4.159 \text{ kg}/\text{m}^3$ y la sobreexcavación disminuyó de 29.01 % a 16.07 %. Estos resultados permitieron evidenciar que la optimización del diseño de voladura mejoró el rendimiento operativo de la labor minera y permitió un mejor control del contorno excavado.

4.9.1. Contrastación de la hipótesis general

Hipótesis general de investigación: Las mejoras en la voladura de rocas influyeron en la optimización de la sobreexcavación y en el aumento de la productividad en la Galería +30 del Nivel 3 en una mina subterránea tipo A durante el año 2025.

Hipótesis nula. (H0):

Las mejoras en la voladura de rocas no influyeron en la optimización de la sobreexcavación ni en el aumento de la productividad en la Galería +30 del Nivel 3.

Decisión:

Con base en los resultados obtenidos, se observó una reducción de la sobreexcavación de 29.01 % a 16.07 %, equivalente a una mejora de 44.60 %, así como un incremento de la producción de 194.65 TPD a 231.20 TPD, equivalente a 18.77 %, y un aumento del avance por disparo de 1.30 a 1.61 m/disparo, equivalente a 24 %. Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis general de investigación, concluyéndose que las mejoras aplicadas en la voladura de rocas sí influyeron positivamente en la reducción de la sobreexcavación y en el incremento de la productividad.

4.9.2. Contrastación de la hipótesis específica 1

Hipótesis específica 1: La optimización del diseño de la malla de perforación mediante el modelo de Holmberg-Persson influyó en el control de la sobreexcavación en la Galería +30 del Nivel 3.

Hipótesis nula. (H0): La optimización del diseño de la malla de perforación mediante el modelo de Holmberg-Persson no influyó en el control de la sobreexcavación.

Decisión:

Los resultados mostraron que, luego de la implementación de la malla optimizada, la

sobreexcavación promedio disminuyó de 29.01 % en el segundo trimestre a 16.07 % en el tercer trimestre, registrándose una reducción de 44.60 %. Este comportamiento evidenció un mejor control del contorno de la excavación y un menor daño al macizo rocoso circundante. En consecuencia, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis específica 1, confirmándose que la aplicación del modelo de Holmberg-Persson contribuyó de manera favorable al control de la sobreexcavación.

4.9.3. Contrastación de la hipótesis específica 2

Hipótesis específica 2: La mejora de la fragmentación del macizo rocoso mediante la predicción del tamaño P80 utilizando el modelo Kuz-Ram y su validación con el software Split Desktop influyó positivamente en el proceso de voladura.

Hipótesis nula. (H0): La aplicación del modelo Kuz-Ram y su validación con Split Desktop no mejoraron la fragmentación del macizo rocoso.

Decisión:

En el segundo trimestre, el valor promedio de P80 fue de 9.76 pulgadas, mientras que en el tercer trimestre se redujo a 7.97 pulgadas, representando una mejora de 18.38 %. Asimismo, el valor teórico estimado mediante Kuz-Ram fue coherente con los resultados obtenidos en campo y validados con Split Desktop, lo cual confirmó que la fragmentación lograda fue más fina y uniforme. Por ello, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis específica 2, concluyéndose que la aplicación del modelo Kuz-Ram permitió mejorar la fragmentación del material volado.

4.9.4. Contrastación de la hipótesis específica 3

Hipótesis específica 3: La optimización del diseño de voladura influyó en la productividad del avance diario de la labor minera en la Unidad Minera Magistral.

Hipótesis nula. (H0): La optimización del diseño de voladura no influyó en la productividad del avance diario de la labor minera.

Decisión:

Los resultados obtenidos evidenciaron que la optimización del diseño de voladura incrementó la producción promedio de 194.65 TPD a 231.20 TPD, así como el avance por disparo de 1.30 a 1.61 m/disparo. Estos resultados demostraron un mejor aprovechamiento de la perforación efectiva y una mayor eficiencia en la liberación de energía explosiva, reflejándose en un mejor rendimiento del ciclo de minado. En consecuencia, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis específica 3, estableciéndose que la optimización del diseño de voladura sí influyó positivamente en la productividad del avance diario.

De manera integral, la contrastación de hipótesis permitió comprobar que la mejora aplicada en la voladura de rocas generó efectos favorables en la operación minera. La reducción de la sobreexcavación, la mejora de la fragmentación, el incremento del avance por disparo y el aumento de la producción demostraron que la malla optimizada implementada en el tercer trimestre fue técnicamente más eficiente que la empleada en el segundo trimestre. Por ello, se concluyó que la propuesta de optimización cumplió con los objetivos planteados y validó las hipótesis formuladas en la investigación

Tabla 12.

Contrastación de hipótesis

Hipótesis	Resultado observado	Decisión
Hipótesis general	La sobreexcavación se redujo de 29.01 % a 16.07 % y la producción aumentó de 194.65 a 231.20 TPD	Se rechaza H0 y se acepta la hipótesis general
Hipótesis específica 1	La sobreexcavación disminuyó en 44.60 % con la malla optimizada	Se rechaza H0 y se acepta la hipótesis específica 1
Hipótesis específica 2	El P80 se redujo de 9.76 a 7.97 pulgadas y fue validado con Split Desktop	Se rechaza H0 y se acepta la hipótesis específica 2
Hipótesis específica 3	El avance por disparo subió de 1.30 a 1.61 m/disparo y la producción aumentó 18.77 %	Se rechaza H0 y se acepta la hipótesis específica 3

Nota. Resultados de la contrastación de hipótesis



CONCLUSIONES

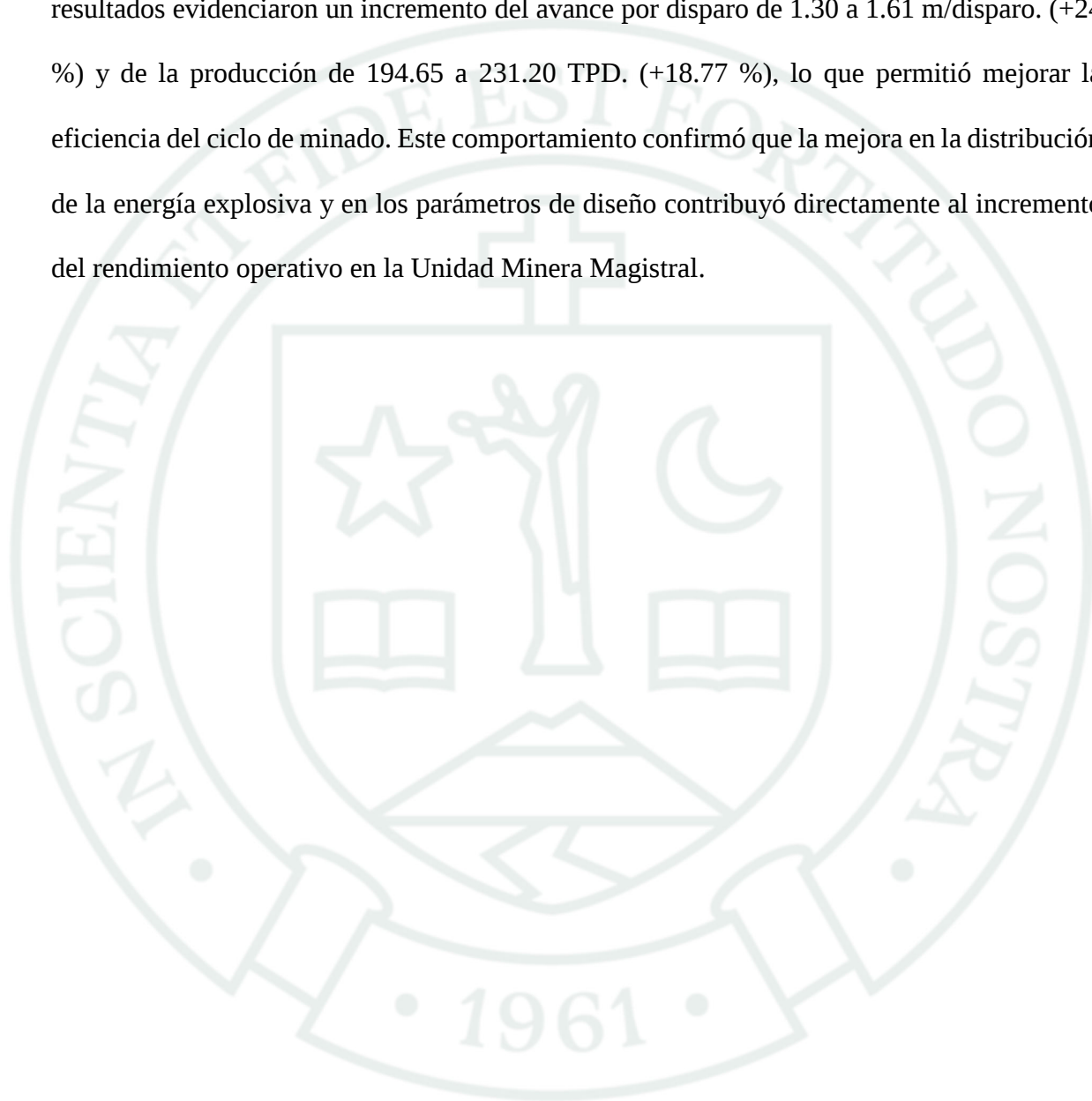
Respecto del Objetivo General: Se concluyó que la implementación de las mejoras en la voladura de rocas influyó de manera positiva en la optimización de la sobreexcavación y en el incremento de la productividad en la Galería +30 del Nivel 3 de la Unidad Minera Magistral durante el año 2025. Los resultados evidenciaron una reducción de la sobreexcavación de 29.01 % a 16.07 %. (-44.60 %), así como un incremento de la producción de 194.65 a 231.20 TPD. (+18.77 %) y del avance por disparo de 1.30 a 1.61 m/disparo. (+24 %) Estos resultados confirmaron que la optimización del diseño de voladura permitió mejorar significativamente el desempeño operativo de la labor minera.

Respecto del Objetivo Específico 1: Se determinó que la optimización del diseño de la malla de perforación mediante el modelo de Holmberg-Persson influyó directamente en el control de la sobreexcavación. La aplicación de parámetros adecuados de burden, espaciamiento y distribución de carga permitió reducir el porcentaje de sobreexcavación de 29.01 % a 16.07 %, evidenciando un mejor control del contorno de la excavación y una disminución del daño al macizo rocoso circundante. En consecuencia, se confirmó que el uso de este modelo constituye una herramienta efectiva para mejorar la calidad geométrica de la labor minera.

Respecto del Objetivo Específico 2: Se concluyó que la aplicación del modelo Kuz-Ram permitió mejorar la fragmentación del macizo rocoso, obteniéndose una reducción del P80 de 9.76 a 7.97 pulgadas. (-18.38 %) Asimismo, el valor teórico estimado mediante el modelo fue consistente con el valor real medido utilizando el software Split Desktop, lo cual validó la precisión del diseño de voladura implementado. Este resultado demostró que una adecuada estimación y control de la fragmentación contribuye significativamente a optimizar

las operaciones posteriores de carguío y transporte.

Respecto del Objetivo Específico 3: Se determinó que la optimización del diseño de voladura tuvo un efecto positivo en la productividad del avance diario de la labor minera. Los resultados evidenciaron un incremento del avance por disparo de 1.30 a 1.61 m/disparo. (+24 %) y de la producción de 194.65 a 231.20 TPD. (+18.77 %), lo que permitió mejorar la eficiencia del ciclo de minado. Este comportamiento confirmó que la mejora en la distribución de la energía explosiva y en los parámetros de diseño contribuyó directamente al incremento del rendimiento operativo en la Unidad Minera Magistral.



RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar de manera permanente el diseño optimizado de la malla de perforación y voladura en la Galería +30 del Nivel 3, debido a que ha demostrado mejoras significativas en la productividad, fragmentación y control de la sobreexcavación. Asimismo, se sugiere estandarizar los parámetros de diseño obtenidos en el tercer trimestre, tales como burden, espaciamiento, factor de carga y distribución de taladros, con el fin de garantizar la continuidad de los resultados alcanzados en la operación minera.

Se recomienda aplicar de forma sistemática el modelo de Holmberg-Persson para el diseño de taladros de contorno en labores subterráneas, ya que ha permitido reducir significativamente la sobreexcavación y mejorar la estabilidad del macizo rocoso. De igual manera, se sugiere capacitar al personal operativo en la correcta ejecución del diseño de perforación, asegurando el control de la desviación de taladros, el correcto carguío y el adecuado uso de materiales de taponamiento para optimizar el confinamiento de la energía explosiva.

Se recomienda continuar utilizando el modelo Kuz-Ram como herramienta de predicción de la fragmentación, complementándolo con la medición en campo mediante el software Split Desktop, con el objetivo de realizar un control continuo de la calidad del material volado. Esto permitirá ajustar oportunamente los parámetros de voladura y mantener una fragmentación adecuada que favorezca las operaciones de carguío y transporte, reduciendo costos operativos y tiempos de ciclo.

Asimismo, se recomienda realizar evaluaciones periódicas del factor de carga. (kg/m^3) y del factor de potencia. (kg/t), con el fin de optimizar el consumo de explosivos sin generar efectos negativos en la sobreexcavación. Un control adecuado de estos parámetros permitirá

mantener un equilibrio entre la eficiencia de la fragmentación y la estabilidad del macizo rocoso, evitando sobreroturas y pérdidas de material.

Finalmente, se recomienda extender la aplicación de la metodología empleada en esta investigación a otras labores de la unidad minera, así como a otras operaciones con condiciones geomecánicas similares. Del mismo modo, se sugiere incorporar herramientas de simulación como JKSimBlast en la planificación de voladuras, así como sistemas de monitoreo continuo de indicadores operativos, con el fin de fortalecer la toma de decisiones y promover la mejora continua de los procesos de perforación y voladura en minería subterránea.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero Vergara, A. (2021). Propuesta de una malla de perforación y voladura para labores de avance en minería subterránea [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22526>
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- Brady, B. H. G., y Brown, E. T. (2006). Rock mechanics for underground mining (3.^a ed.). Springer.
- Cunningham, C. V. B. (1983). The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. En Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Luleå, Sweden.
- García, M. (2021). Diseño de perforación y voladura para optimizar el avance en túneles mineros [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Hinostroza Araujo, F. (2022). Voladura diferenciada para reducir la dilución en minería subterránea [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe>
- Hoek, E. (2007). Practical rock engineering. Rocscience. <https://www.rocscience.com>
- Huerta, J. (2023). Implementación del método de explotación corte y relleno ascendente para la extracción de reservas minerales del tajo 328 Cía. Minera Magistral de Huaraz S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio

- UNASAM. <https://repositorio.unasam.edu.pe>
- Hustrulid, W., y Bullock, R. (2001). Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., y Carcedo, F. J. A. (1995). Drilling and blasting of rocks. A. A. Balkema Publishers.
- JKTech. (2023). JKSimBlast blasting simulation software manual. JKTech Pty Ltd. <https://jktech.com.au>
- Konya, C. J., y Walter, E. J. (1990). Surface blast design. Prentice Hall.
- López, J. (2023). Optimización de la fragmentación en minería subterránea mediante modelos de voladura [Tesis de pregrado, Universidad de Oviedo]. Digibuo. <https://digibuo.uniovi.es>
- Orbezo, M. (2024). Modelo de malla en perforación y voladura en la optimización de la fragmentación del avance en By Pass 140 – Nivel 7 Unidad Minera S.R.M.L. Magistral de Huaraz [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio UNDAC. <https://repositorio.undac.edu.pe>
- Persson, P. A., Holmberg, R., y Lee, J. (1994). Rock blasting and explosives engineering. CRC Press.
- Porta, L. (2025). Aplicación de la mejora continua en la extracción minera de la U.E.A – S.M.R.L. Magistral de Huaraz S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio UNICA. <https://repositorio.unica.edu.pe>
- Ramos, P. (2022). Optimización del diseño de perforación y tronadura en minería subterránea [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl>
- Split Engineering. (2023). Split-Desktop fragmentation analysis software user guide. Split

Engineering LLC. <https://www.spliteng.com>

Vega Gonzáles, F. (2021). Optimización de la perforación y voladura en galerías subterráneas para mejorar el avance lineal [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].

Repositorio UNDAC. <https://repositorio.undac.edu.pe>

