



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**Optimización de la voladura en frentes de avance para minimizar los costos
de extracción en una mina subterránea modelo**

Tesis presentada por:

Peralta Salazar, Luis Fernando

ORCID: 0009-0008-6448-3087

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Morales Valdivia, Javier Antonio

ORCID: 0009-0001-9307-4599

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 15 de Junio del 2026

Dictamen: 018255-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 018255, presentado por:

2016220131 - PERALTA SALAZAR LUIS FERNANDO

Titulado:

OPTIMIZACION DE LA VOLADURA EN FRENTE DE AVANCE PARA MINIMIZAR LOS COSTOS DE EXTRACCION EN UNA MINA SUBTERRANEA MODELO

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



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



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



Optimización de la voladura en frentes de avance para minimizar los costos de extracción en un subterránea modelo

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

14%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

2

repositorio.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

3

Submitted to Universidad Nacional de Moquegua

Trabajo del estudiante

Excluir citas

Excluir bibliografía

Apagado

Apagado

Excluir coincidencias

< 1%

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía en los momentos de incertidumbre y mi fortaleza en los días de dificultad, permitiéndome alcanzar este punto tan importante de mi vida.

A mis padres, Alexandro y Rosmery, quienes representan la razón más grande de mis esfuerzos. Este logro es el reflejo de cada sacrificio realizado, de cada consejo brindado en el momento preciso y de cada palabra de aliento cuando más lo necesité. Gracias por enseñarme que, con humildad, trabajo y perseverancia, todo es posible.

A mis abuelitos, que desde el cielo me acompañan y cuidan, siendo una inspiración constante en mi camino.

A mi familia, por estar siempre presente, por su apoyo incondicional y por recordarme constantemente el valor de no rendirme.

Y a mí mismo, por no detenerme, por levantarme en cada caída y por mantener firme la convicción de alcanzar mis sueños. Este logro no es solo una meta cumplida, sino el inicio de un camino lleno de nuevos desafíos y oportunidades.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por ser la luz que guio cada uno de mis pasos, por darme la fortaleza en los momentos de dificultad y la sabiduría necesaria para culminar esta importante etapa de mi vida profesional.

Expreso mi más profundo y sincero agradecimiento a mi asesor, por su invaluable orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Sus enseñanzas no solo hicieron posible la culminación de este trabajo, sino que también marcaron significativamente mi formación como profesional.

A los docentes de mi carrera, quienes con vocación, dedicación y entrega contribuyeron a mi desarrollo académico y personal, brindándome herramientas fundamentales para afrontar los desafíos de mi vida profesional.

Asimismo, expreso mi gratitud a la empresa donde desarrollé mis prácticas profesionales, por la confianza depositada en mí y por brindarme la oportunidad de adquirir experiencia en un entorno real, fortaleciendo mis conocimientos y capacidades.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y constante motivación, siendo el pilar fundamental que me impulsó a seguir adelante y a no rendirme ante las adversidades.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, formaron parte de este proceso y contribuyeron a la culminación de este trabajo.

Este logro no es solo mío, sino también de todos aquellos que caminaron conmigo a lo largo de este proceso.

Resumen

La presente investigación evaluó la optimización del diseño de voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo durante el año 2025, con el objetivo de minimizar los costos de extracción mediante la mejora de la fragmentación del macizo rocoso. Se aplicaron herramientas como el software JKSimBlast para la simulación del diseño de voladura, el modelo de Holmberg para el ajuste de parámetros geométricos y el software Split Desktop para la medición de la fragmentación. La metodología se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, comparando los resultados del segundo trimestre sin optimización y el tercer trimestre con implementación, considerando una voladura diaria.

Los resultados evidenciaron mejoras significativas en los indicadores operativos, registrándose un incremento en la producción de 171.16 a 201.98 TPD. (+18.01%) y en el avance por disparo de 1.30 m a 1.61 m. (+24.40%) Asimismo, la fragmentación del material volado mejoró al reducirse el P80 de 9.76 a 7.95 pulgadas. (-18.47%), lo que permitió obtener una granulometría más uniforme y la necesidad de voladura secundaria. El factor de carga se incrementó de manera controlada de 3.968 a 4.158 kg/m³. (+4.79%), optimizando la distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso.

En términos económicos, el costo unitario de extracción disminuyó de 116.80 a 92.29 USD/T. (-20.98%), evidenciando que la mejora en la fragmentación y el incremento del avance por disparo contribuyeron directamente a la reducción de costos operativos. En conclusión, la optimización del diseño de voladura permitió mejorar la eficiencia técnica y económica del proceso de minado, validando la importancia del uso de modelos matemáticos y herramientas digitales en la planificación de voladuras en minería subterránea.

Palabras clave: Voladura, Fragmentación, Costos.

Abstract

This research evaluated the optimization of blasting design in Level 3 Gallery GL 138S of a model underground mine during 2025, aiming to minimize extraction costs through improved rock mass fragmentation. Tools such as JKSimBlast software were applied for blasting design simulation, the Holmberg model for adjusting geometric parameters, and Split Desktop software for fragmentation measurement. The methodology followed a quantitative approach, comparing the results from the second quarter without optimization and the third quarter with implementation, considering one blast per day.

The results showed significant improvements in operational indicators. Production increased from 171.16 to 201.98 TPD. (+18.01%), and advance per blast improved from 1.30 m to 1.61 m. (+24.40%) Additionally, rock fragmentation improved as the P80 decreased from 9.76 to 7.95 inches. (-18.47%), resulting in a more uniform particle size distribution and eliminating the need for secondary blasting. The powder factor increased in a controlled manner from 3.968 to 4.158 kg/m³. (+4.79%), optimizing the distribution of explosive energy in the rock mass.

From an economic perspective, the unit extraction cost decreased from 116.80 to 92.29 USD/T. (-20.98%), demonstrating that improved fragmentation and increased advance per blast directly contributed to cost reduction. In conclusion, the optimization of blasting design enhanced both technical and economic efficiency, highlighting the importance of applying mathematical models and digital tools in underground mining blasting planning.

Keywords: Blasting, Fragmentation, Costs.

Índice general

Dedicatoria	
Agradecimiento	
Resumen	
Abstract	
Introducción	1
Capítulo I: Planteamiento de la investigación	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Preguntas de investigación	5
1.3.1 Pregunta general	5
1.3.2 Preguntas específicas	6
1.4 Línea de investigación	6
1.5 Palabras clave	7
1.6 Solución propuesta	7
1.6.1 Justificación e importancia	7
Capítulo II: Fundamentos teóricos	9
2.1 Estado del arte	9

2.1.1	Antecedentes locales.....	9
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	11
2.1.3	Antecedentes internacionales	12
2.2	Bases Teóricas de la investigación.....	14
2.2.1	Teoría de la fragmentación de rocas por acción de explosivos	14
2.2.2	Modelo de Holmberg para diseño de voladuras subterráneas	15
2.2.3	Simulación de voladuras mediante JKSimBlast.....	15
2.2.4	Medición de fragmentación mediante análisis digital de imágenes	16
2.2.5	Relación entre fragmentación y costos de extracción	17
2.3	Definiciones.....	18
2.3.1	Voladura subterránea.....	18
2.3.2	Fragmentación	18
2.3.3	Burden	18
2.3.4	Espaciamiento.....	19
2.3.5	Factor de carga.....	19
2.3.6	Secuencia de iniciación	19
2.3.7	P80	19
2.3.8	Voladura secundaria	20
2.3.9	Macizo rocoso.....	20
2.3.10	Discontinuidades	20

2.3.11	Energía explosiva	20
2.3.12	Malla de perforación.....	20
2.3.13	Sobreexcavación.....	21
2.3.14	Subexcavación.....	21
2.3.15	Modelo de Holmberg.....	21
2.3.16	Simulación de voladura	21
2.3.17	Costo unitario de extracción	21
2.3.18	Ciclo de minado.....	22
2.3.19	Estabilidad geomecánica	22
2.3.20	Optimización de procesos mineros.....	22
2.4	Hipótesis de investigación.....	22
2.4.1	Hipótesis general	22
2.4.2	Hipótesis específicas.....	22
2.5	Variables	23
2.5.1	Variable independiente	23
2.5.2	Variable dependiente	24
2.5.3	Operacionalización de variables.....	25
Capítulo III: Marco metodológico		27
3.1	Alcances y limitaciones.....	27
3.1.1	Alcances.....	27

3.1.2	Limitaciones	27
3.2	Tipo y nivel de investigación	28
3.2.1	Tipo de investigación.....	28
3.2.2	Nivel de investigación	28
3.3	Población y muestra o universo.....	28
3.3.1	Población	28
3.3.2	Muestra	29
3.3.3	Medidas de dispersión por indicador.....	29
3.4	Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos	30
3.4.1	Método de la investigación.....	30
3.4.2	Técnicas de recolección de datos.....	31
3.4.3	Instrumentos de recolección de datos	31
3.4.4	Herramientas y software utilizados en la investigación	32
3.5	Plan de análisis de los datos	34
3.5.1	Técnicas de análisis de datos	34
3.5.2	Control de calidad de datos	34
3.5.3	Evaluación estadística de resultados.....	35
3.6	Procedimiento de la investigación.....	35
	Capítulo IV: Resultados y análisis.....	37
4.1	Aplicación de fórmulas de Holmberg para el tercer trimestre	41

4.1.1	Cálculo del burden. (B)	43
4.1.2	Cálculo del espaciamiento. (S)	44
4.1.3	Cálculo del factor de carga. (q)	44
4.1.4	Cálculo del avance por disparo. (M)	45
4.1.5	Relación con la fragmentación. (P80)	46
4.1.6	Impacto en costos. (USD/T)	46
4.2	Aplicación del modelo Kuz-Ram para el tercer trimestre	47
4.2.1	Volumen de roca por taladro	47
4.2.2	Carga explosiva por taladro	47
4.2.3	Cálculo del tamaño medio X_{50}	48
4.2.4	Cálculo del P80 con Rosin-Rammler	50
4.2.5	Ajuste por factor de campo	51
4.2.6	Simulación JKSimblast	52
4.3	Aplicación del Split Destop	60
4.4	Incorporación de ejemplos visuales comparativos del muckpile	62
4.5	Diseño de carga en galería 2.10 m x 2.40 m después de la mejora Malla después de la mejora	66
4.6	Validación de los resultados de simulación frente a datos reales	68
4.7	Validación de resultados y aplicabilidad práctica	70
4.8	Resultados por objetivos	71

4.8.1	Resultado del objetivo general	71
4.8.2	Resultado del primer objetivo específico	71
4.8.3	Resultado del segundo objetivo específico.....	72
4.8.4	Resultado del tercer objetivo específico	72
4.9	Resultados generales	96
4.10	Análisis	97
4.10.1	Análisis detallado de la reducción de costos y mejora de fragmentación	99
4.11	Discusiones.....	101
4.12	Discusión sobre los límites del incremento del factor de carga	105
4.13	Discusión sobre daño al contorno y estabilidad del macizo.....	107
4.14	Contrastación de hipótesis.....	108
4.14.1	Contrastación de la hipótesis general	108
4.14.2	Contrastación de la primera hipótesis específica.....	109
4.14.3	Contrastación de la segunda hipótesis específica	109
4.14.4	Contrastación de la tercera hipótesis específica	110
	Conclusiones	111
	Recomendaciones	113
	Referencias bibliográficas.....	115

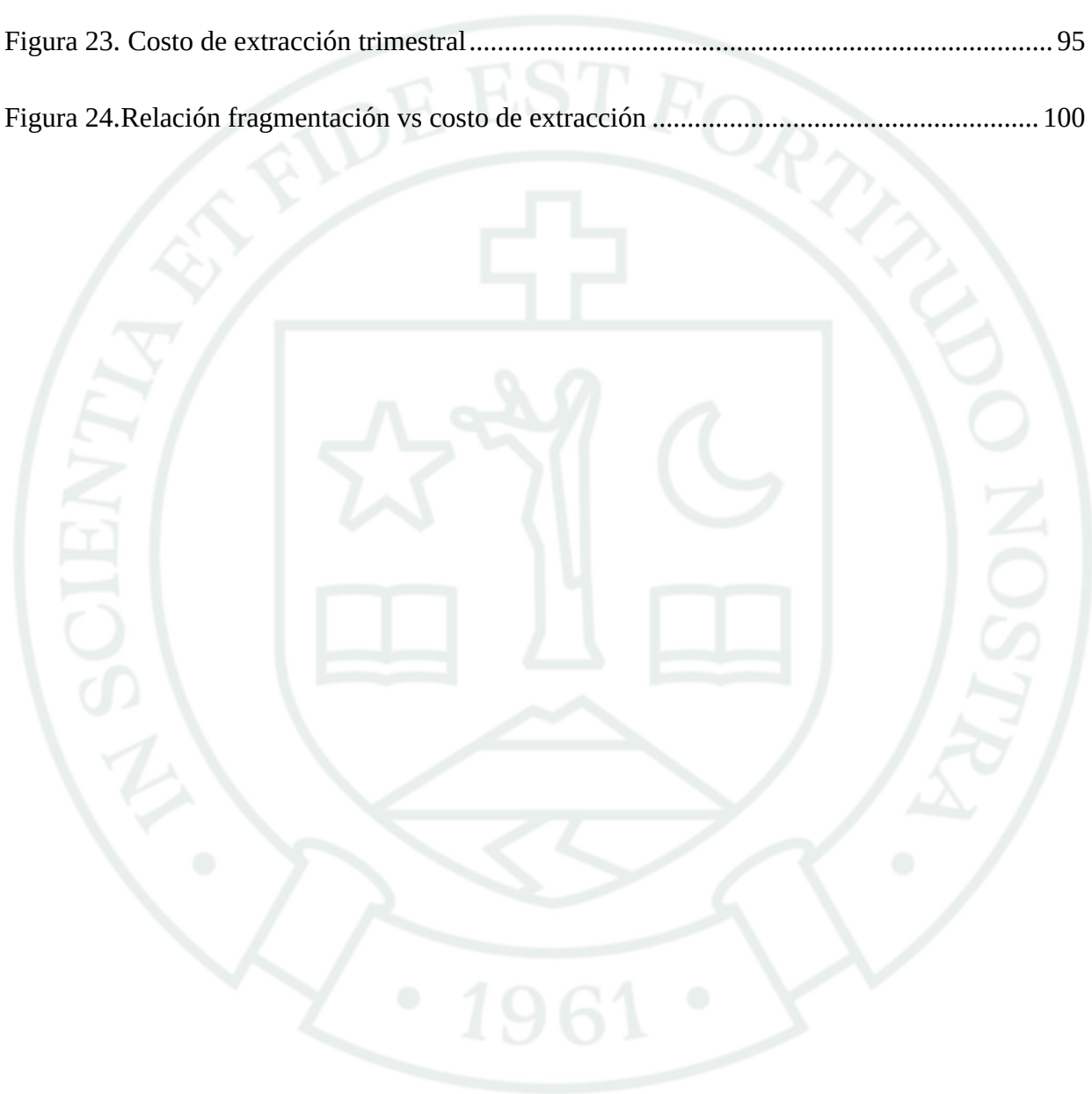
Índice de tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables.....	25
Tabla 2	Nomenclatura	38
Tabla 3	Parámetros segundo trimestre	40
Tabla 4	Aplicación del Split Desktop.....	61
Tabla 5	Parámetros tercer trimestre.....	67
Tabla 6	Parámetros abril 2025.....	73
Tabla 7	Parámetros de mayo 2025	75
Tabla 8	Parámetros de junio 2025	77
Tabla 9	Parámetros de julio del 2025	79
Tabla 10	Parámetros de agosto del 2025.....	81
Tabla 11	Parámetros de septiembre del 2025.....	83
Tabla 12	Comparativo de resultados: segundo vs tercer trimestre.....	97
Tabla 13	Comparativa consolidada de indicadores	99

Índice de figuras

Figura 1. Interfaz de simulación de diseño y secuencia de disparo	16
Figura 2. Curva granulométrica obtenida mediante análisis digital de fragmentación	17
Figura 3. Malla antes de la mejora.....	39
Figura 4. Malla de perforación	52
Figura 5. Primado de taladros	53
Figura 6. Carguío de taladros.....	54
Figura 7. Taco	55
Figura 8. Amarre.....	56
Figura 9. Detonación.....	57
Figura 10. Curvas de energía	58
Figura 11. Campo de energía.....	59
Figura 12. Muckpile – Segundo trimestre. (sin optimización)	62
Figura 13. Muckpile – Tercer trimestre. (con optimización).....	64
Figura 14. Producción mensual	85
Figura 15. Producción trimestral	86
Figura 16. Avance por disparo mensual	87
Figura 17. Avance por disparo trimestral	88
Figura 18. Fragmentación mensual.....	89
Figura 19. Fragmentación trimestral.....	90

Figura 20. Factor de carga mensual	91
Figura 21. Factor de carga trimestral	92
Figura 22. Costo de extracción mensual	93
Figura 23. Costo de extracción trimestral	95
Figura 24. Relación fragmentación vs costo de extracción	100



Introducción

En la minería subterránea, el proceso de perforación y voladura constituye una de las etapas más críticas del ciclo de minado, ya que define la fragmentación del macizo rocoso y condiciona directamente el rendimiento de las operaciones posteriores, como el carguío, el transporte y la reducción de tamaño. Una fragmentación inadecuada puede generar material sobredimensionado, mayores tiempos de limpieza, incremento en el consumo energético y, en consecuencia, un aumento en los costos unitarios de extracción. Por ello, la optimización del diseño de voladura se ha convertido en un aspecto clave para mejorar la eficiencia técnica y económica de las operaciones mineras subterráneas.

En este contexto, la presente investigación se desarrolló en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo durante el año 2025, donde se identificó que el diseño convencional de voladura generaba una fragmentación relativamente gruesa, limitando el avance por disparo y elevando los costos operativos. Frente a esta problemática, se planteó la optimización del diseño de voladura mediante la aplicación del modelo de Holmberg, la simulación con el software JKSimBlast y la evaluación de la fragmentación mediante el software Split Desktop, herramientas que permiten mejorar la distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso.

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo y comparativo, analizando los resultados obtenidos en el segundo trimestre sin optimización y el tercer trimestre con la implementación del rediseño de voladura, considerando una voladura diaria. Se evaluaron indicadores clave como la producción. (TPD), el avance por disparo. (M), la fragmentación. (P80), el factor de carga. (KG/m^3) y el costo unitario de extracción. (USD/T), con el propósito de determinar el impacto de la optimización en el desempeño operativo del frente de avance.

Los resultados obtenidos demostraron que la optimización del diseño de voladura permitió mejorar significativamente la fragmentación del material volado, incrementar el avance por disparo y reducir los costos de extracción, evidenciando la relación directa entre estos indicadores. En este sentido, el estudio contribuye a fortalecer el conocimiento técnico sobre la aplicación de modelos matemáticos y herramientas digitales en la planificación de voladuras, proponiendo una metodología replicable para mejorar la eficiencia y competitividad en operaciones de minería subterránea.



Capítulo I: Planteamiento de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

En la minería subterránea, la voladura en frentes de avance constituye una de las actividades más determinantes dentro del ciclo de minado, debido a su influencia directa en la fragmentación del macizo rocoso, la estabilidad del frente, la dilución y los costos asociados al carguío, sostenimiento y transporte. Un diseño inadecuado de malla de perforación o una distribución deficiente de la carga explosiva puede generar sobrefragmentación o bloques sobredimensionados, incrementando el tiempo de limpieza y los costos unitarios de extracción. En este contexto, la optimización de los parámetros de voladura se convierte en un factor clave para mejorar la eficiencia operativa en labores subterráneas. (Holmberg & Persson, 1979; Konya & Walter, 1990)

En la Mina subterránea modelo, específicamente en el Nivel 3 Galería GL 138S, se ejecutó una voladura diaria durante el segundo y tercer trimestre del año 2025. Durante el segundo trimestre, la operación se desarrolló sin la aplicación de mejoras técnicas en el diseño de voladura, observándose variabilidad en la fragmentación, mayor presencia de bloques mayores al tamaño óptimo y un incremento en los tiempos de limpieza. Esta situación generó impactos económicos en los costos de extracción por metro avanzado, afectando la productividad del frente.

La fragmentación obtenida en una voladura subterránea influye directamente en el rendimiento de los equipos de carguío y en el consumo energético durante el proceso de transporte interno. Estudios especializados demuestran que una fragmentación controlada reduce los tiempos de ciclo, mejora la estabilidad del macizo remanente y disminuye la necesidad de

voladura secundaria, lo que repercute en menores costos operativos. (López Jimeno et al., 2017; Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)

Durante el tercer trimestre de 2025 se planteó la implementación de un rediseño técnico utilizando el software JKSimBlast para la simulación de la voladura, el modelo matemático de Holmberg para la estimación del comportamiento de la carga explosiva y el software Split Desktop para la medición digital de la fragmentación. Esta intervención técnica buscó ajustar el burden, espaciamiento, factor de carga y secuencia de disparo, con la finalidad de obtener una fragmentación más uniforme y acorde con las capacidades del sistema de limpieza en la galería evaluada.

La ausencia de una optimización sistemática de los parámetros de voladura en frentes de avance puede generar ineficiencias acumulativas que impactan en el costo por metro lineal excavado. Diversas investigaciones en minería subterránea señalan que el diseño empírico, sin validación mediante modelos de simulación y medición digital de fragmentación, incrementa la variabilidad de resultados y limita el control técnico del proceso. (Bieniawski, 1989; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

En este escenario, surge la necesidad de evaluar técnicamente la optimización de la voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S de la Mina subterránea modelo, comparando el segundo trimestre de 2025 sin mejora y el tercer trimestre de 2025 con la implementación del rediseño, con el propósito de determinar su impacto en la fragmentación y en los costos de extracción.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Optimizar la voladura en frentes de avance en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo durante el año 2025, mediante la aplicación del software

JKSimBlast, el modelo de Holmberg y la medición de fragmentación con Split Desktop, con la finalidad de minimizar los costos de extracción, comparando el segundo trimestre sin mejora y el tercer trimestre con implementación.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Determinar la variación de la fragmentación del material volado en el tercer trimestre de 2025, utilizando Split Desktop, en comparación con los resultados obtenidos en el segundo trimestre sin optimización.
- Ajustar los parámetros de diseño de voladura, tales como burden, espaciamiento y factor de carga, mediante simulación en JKSimBlast y aplicación del modelo de Holmberg, para reducir la presencia de sobredimensionados y la necesidad de voladura secundaria.
- Evaluar el impacto de la mejora en la fragmentación sobre el costo unitario de extracción por metro lineal avanzado, comparando los resultados operativos del segundo y tercer trimestre del año 2025.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 *Pregunta general*

- ¿De qué manera la optimización de la voladura en frentes de avance influirá en la minimización de los costos de extracción en el Nivel 3 ¿Galería GL 138S de la mina subterránea modelo durante el año 2025, considerando la comparación entre el segundo trimestre sin mejora y el tercer trimestre con implementación del rediseño de voladura?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Cómo influirá la aplicación del diseño de voladura mediante JKSimBlast y el modelo de Holmberg en la mejora de la fragmentación medida con Split Desktop durante el tercer trimestre de 2025?
- ¿En qué medida la optimización del burden, espaciamiento y factor de carga reducirá la presencia de sobredimensionados y la necesidad de voladura secundaria en el frente de avance?
- ¿Cómo impactará la mejora en la fragmentación obtenida en el tercer trimestre de 2025 en el costo unitario de extracción por metro lineal avanzado en comparación con el segundo trimestre sin mejora?

1.4 Línea de investigación

La presente investigación se inscribe en la línea de Optimización de Procesos Mineros, ya que se orienta al mejoramiento técnico del proceso de perforación y voladura en frentes de avance de minería subterránea, específicamente en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo, mediante la aplicación de herramientas de simulación como JKSimBlast, el modelo matemático de Holmberg y la medición de la fragmentación con Split Desktop. Este enfoque busca optimizar los parámetros de diseño, tales como burden, espaciamiento y factor de carga, para lograr un uso más eficiente de la energía explosiva, mejorar la fragmentación y reducir los costos unitarios de extracción, comparando el segundo trimestre de 2025 sin mejora y el tercer trimestre con implementación. De esta manera, el estudio contribuye a la mejora continua de los procesos productivos mineros, fortaleciendo la eficiencia técnica, el control de costos y la sostenibilidad operativa de la mina subterránea. (Hustrulid & Bullock, 2001; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

1.5 Palabras clave

Optimización de voladura, Fragmentación, Costos de extracción.

1.6 Solución propuesta

1.6.1 Justificación e importancia

La investigación se justifica técnicamente porque permitirá evaluar la optimización del diseño de voladura en frentes de avance mediante la aplicación del software JKSimBlast, el modelo de Holmberg y la medición de la fragmentación con Split Desktop en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo. El ajuste adecuado de parámetros como burden, espaciamiento y factor de carga mejora la distribución de energía explosiva y favorece una fragmentación controlada, reduciendo la variabilidad del proceso y fortaleciendo el control técnico del disparo. (Persson, Holmberg & Lee, 1994; López Jimeno et al., 2017)

Desde el punto de vista operacional, la investigación permitirá analizar cómo la mejora en la fragmentación influirá en los tiempos de limpieza del frente y en la continuidad del ciclo de minado, considerando una voladura diaria durante el segundo y tercer trimestre de 2025. Una fragmentación homogénea contribuye a reducir tiempos improductivos, mejorar el rendimiento del carguío y optimizar la disponibilidad del frente para las siguientes actividades del ciclo operativo. (Hustrulid & Bullock, 2001)

En el ámbito económico, el estudio se justifica porque evaluará la relación directa entre calidad de fragmentación y costo unitario de extracción por metro lineal avanzado. Una voladura optimizada disminuye la necesidad de voladura secundaria, reduce el consumo energético en limpieza y transporte, y minimiza costos asociados a reprocesos, lo

que impacta favorablemente en la estructura de costos de la operación subterránea.

(Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995; Konya & Walter, 1990)

Desde la perspectiva social, la investigación aportará a la sostenibilidad de la operación minera al promover prácticas técnicas más eficientes que optimicen el uso del recurso mineral y reduzcan pérdidas operativas. La mejora en los procesos productivos contribuye a la estabilidad laboral, continuidad de la operación y generación de valor en el entorno minero, fortaleciendo la responsabilidad empresarial en el ámbito local. (Hustrulid & Bullock, 2001)

En el aspecto de seguridad, la optimización de la voladura favorece un mejor control del macizo rocoso remanente, disminuyendo riesgos asociados a sobreexcavación, caída de rocas y generación de bloques inestables en el frente de avance. Un diseño adecuado reduce vibraciones innecesarias y mejora la estabilidad geomecánica, contribuyendo a un entorno de trabajo más seguro para el personal operativo. (Bieniawski, 1989; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

Finalmente, la investigación se justifica metodológicamente porque realizará una comparación entre el segundo trimestre de 2025 sin mejora y el tercer trimestre con implementación del rediseño, utilizando herramientas de simulación y medición digital que permitirán obtener datos cuantificables y verificables. Este enfoque fortalecerá la validez técnica del estudio y generará evidencia aplicada para futuras decisiones en el diseño de voladuras subterráneas. (López Jimeno et al., 2017)

Capítulo II: Fundamentos teóricos

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes locales

- Según Orbezo (2024), en su tesis “Modelo de malla en perforación y voladura en la optimización de la fragmentación del avance de By Pass 140 – Nivel 7 Unidad Minera SRML Magistral de Huaraz SAC, UEA Aquia 2022”, en Huaraz, Perú: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. El objetivo fue actualizar el modelo de malla de perforación y voladura para optimizar la fragmentación en el avance del By Pass 140 en la Mina subterránea modelo; la investigación usó métodos de campo, gabinete y laboratorio con aplicación del método matemático de Holmberg para rediseñar parámetros geométricos de taladros y cargas; el diseño fue cuantitativo correlacional con muestra de trabajos de perforación reales en el nivel estudiado; los resultados revelaron que la malla rediseñada redujo significativamente las deficiencias de voladura y mejoró el control de la granulometría, lo que implicó menores sobreroturas y mayor eficiencia operativa; se concluyó que aplicar un modelo matemático ajustado de malla reduce incidencias de fragmentación deficiente y puede disminuir los costos operativos asociados a reprocesos en voladura, aportando evidencia directa para tu investigación sobre optimización de parámetros técnicos en Magistral.
- Según Chávez (2015), en su tesis “Mejora de la granulometría mediante el diseño de malla de perforación y voladura aplicando el modelo de Holmberg en la galería 370 de la zona Coturcan en la mina Huancapeti”, en Huaraz, Perú: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Esta tesis tuvo como objetivo evaluar cómo

la aplicación del modelo de Holmberg en el diseño de la malla de perforación y voladura puede mejorar la distribución de tamaños de fragmentos en labores subterráneas; se utilizó un enfoque cuantitativo y de análisis de voladuras reales en la galería con muestreo de datos de fragmentación antes y después del rediseño; el diseño fue comparativo descriptivo con recolección de datos operativos y análisis estadístico; los resultados indicaron mejoras en P80 y reducción de sobreroturas tras aplicar la nueva malla; se concluyó que parámetros geométricos óptimos contribuyen a una fragmentación más uniforme y menos reprocesos, lo cual aporta una base técnica directamente relacionada a tu tema de optimización de voladura y fragmentación en contextos geomecánicos similares.

- Según Quispe (2019), en su tesis “Optimización de perforación y voladura en la explotación por Sublevel Stoping. (taladros largos) – Compañía Minera Shuntur S.A.C.”, en Huaraz, Perú: Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. El estudio buscó optimizar las operaciones de perforación y voladura mediante la aplicación de métodos de explotación Sublevel Stoping con taladros largos, evaluando su impacto en costos de producción minera; usó un diseño experimental descriptivo con población constituida por tajos específicos. (Tj918 y Tj917 NV 720) y muestreo intencional de estos taladros; se recolectaron datos de tiempos de perforación, parámetros de voladura y costos operativos antes y después de implementar la optimización propuesta; los resultados mostraron que la técnica aplicada mejoró la eficiencia de voladura y redujo costos de producción, lo que sugiere que optimizar diseño y parámetros técnicos de voladura puede traducirse en beneficios económicos y productivos; este antecedente respalda metodologías y

resultados de tu investigación sobre procesos técnicos y económicos de voladura subterránea en la región de Huaraz.

2.1.2 Antecedentes nacionales

- Según Lopez (2024), en su tesis “Análisis de las variables de perforación y voladura en la rampa. (-) RP 5585 SW-NV 1070 para la mejora en el avance efectivo en la mina Yauricocha de Sierra Metals Inc., 2023”, en la Universidad Continental; Huancayo, Perú]. El objetivo fue analizar cómo las variables de perforación y voladura. (metros perforados, factor de carga, consumo de explosivo) influyen en el avance efectivo de la rampa, usando un diseño cuantitativo inductivo-deductivo con una muestra de 179.40 m programados y 173.87 m ejecutados, hallando que la variabilidad del macizo. (RMR) afectó el avance y que un ajuste técnico de la malla mejora el cumplimiento de avance y reduce los costos por unidad de avance; concluyó que controlar variables técnicas de voladura y perforación incrementa el avance efectivo y puede disminuir costos, aportando evidencia aplicada para tu investigación de diseño óptimo de voladuras subterráneas.
- Según Huincho (2024), en su tesis “Optimización de la perforación y voladura para incrementar el avance lineal en una explotación subterránea”, en la Universidad Continental; Huancayo, Perú. Este estudio cuantitativo aplicado evaluó alternativas de diseño de perforación y voladura para mejorar el avance lineal en labores subterráneas, con un diseño experimental y observación sistemática de parámetros de voladura y perforación como burden, cargas y factor de carga, mostrando que la optimización técnica de estos parámetros mejora significativamente el avance por

disparo y disminuye tiempos improductivos; concluyó que un rediseño racional de voladuras aumenta el rendimiento operacional, lo que aporta un marco técnico útil para justificar la optimización del diseño de voladura en tu tesis, especialmente en comparación de trimestres con y sin mejora.

- Según Gómez & Pérez (2024), en su tesis “Incremento de la longitud de avance de la Galería 10146-NE mediante la mejora de los parámetros de perforación y voladura, Minera Aurífera Retamas S.A.”, en la Universidad Continental; Huancayo, Perú. Enfocado en optimizar parámetros técnicos de voladura para incrementar la longitud de avance de galería, empleó un diseño experimental aplicado en una muestra de galerías del nivel 2950, recolectando datos de consumo de explosivos, avances efectivos y granulometría, encontrando que el ajuste de parámetros redujo consumo de explosivos y mejoró la eficiencia de voladura, concluyendo que diseñar voladuras con criterios técnicos específicos mejora los metros avanzados por disparo y puede reducir costos operativos; aporta evidencia práctica de cómo el ajuste técnico de parámetros afecta la eficiencia en minería subterránea.

2.1.3 Antecedentes internacionales

- Según Aguad (2024), en su tesis “Optimización de la tronadura de precorte en minería a cielo abierto mediante el uso de explosivos con carga dirigida”, La investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la tronadura de precorte utilizando explosivos con carga dirigida para mejorar el control de fragmentación y estabilidad del macizo rocoso; empleó una metodología cuantitativa aplicada con pruebas de campo, análisis granulométrico y evaluación comparativa antes y

después de la optimización; el diseño fue experimental comparativo con muestra de frentes intervenidos en operación minera; los resultados evidenciaron una reducción significativa de sobrerotura y una mejora en la distribución de fragmentos, concluyendo que el ajuste técnico del diseño de voladura incrementa la eficiencia energética y reduce costos asociados a reprocesos; este antecedente aporta a la investigación una base técnica sobre cómo la optimización del diseño y la selección adecuada de explosivos influye directamente en la fragmentación y control operativo.

- Según Rojas (2022), en su tesis “Evaluación de la fragmentación producto de la tronadura en minería subterránea mediante análisis digital de imágenes”, en la Universidad de Chile. El objetivo fue determinar la relación entre parámetros de diseño de tronadura y la fragmentación obtenida en minería subterránea mediante análisis digital de imágenes; la metodología fue cuantitativa con aplicación de software de medición granulométrica y análisis estadístico de parámetros como burden, espaciamiento y factor de carga; el diseño fue correlacional comparativo con muestra de voladuras ejecutadas en distintos niveles productivos; los resultados demostraron que la variación controlada de parámetros influye directamente en el P80 y en la uniformidad de fragmentación, concluyendo que el uso de herramientas digitales mejora la precisión del control de voladuras; este estudio aporta sustento metodológico al uso de software como Split Desktop en la presente investigación para evaluar técnicamente la optimización aplicada.
- Según Figueiredo, Jimeno, & López (2023), en su tesis “Blasting fragmentation study using 3D image análisis” en la Universidad Politécnica de Madrid / Applied

Sciences, Madrid, España. El estudio tuvo como objetivo analizar la influencia de distintos parámetros de voladura en la fragmentación de roca mediante análisis tridimensional de imágenes; se empleó metodología experimental con variación controlada de cargas, espaciamientos y secuencia de iniciación, utilizando procesamiento digital para determinar distribución granulométrica; el diseño fue experimental con múltiples escenarios de voladura y comparación estadística de resultados; los hallazgos evidenciaron que el ajuste técnico de parámetros mejora la uniformidad de fragmentación y optimiza la energía aplicada, concluyendo que la medición digital avanzada permite validar científicamente el desempeño del diseño de voladura; este antecedente aporta a la investigación un respaldo internacional sobre la importancia del análisis digital de fragmentación para optimizar costos y eficiencia en minería.

2.2 Bases Teóricas de la investigación

2.2.1 *Teoría de la fragmentación de rocas por acción de explosivos*

La fragmentación de rocas en minería subterránea ocurre cuando la energía liberada por el explosivo genera ondas de choque que se propagan radialmente desde el taladro hacia el macizo rocoso. Estas ondas inducen esfuerzos de compresión y tracción que superan la resistencia de la roca, produciendo fisuras radiales y circunferenciales que finalmente originan la rotura del material. El grado de fragmentación dependerá de la energía específica aplicada, la calidad del confinamiento y las propiedades geomecánicas del macizo. Un diseño adecuado permite distribuir la energía de manera uniforme y obtener una granulometría compatible con el sistema de carguío. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

2.2.2 *Modelo de Holmberg para diseño de voladuras subterráneas*

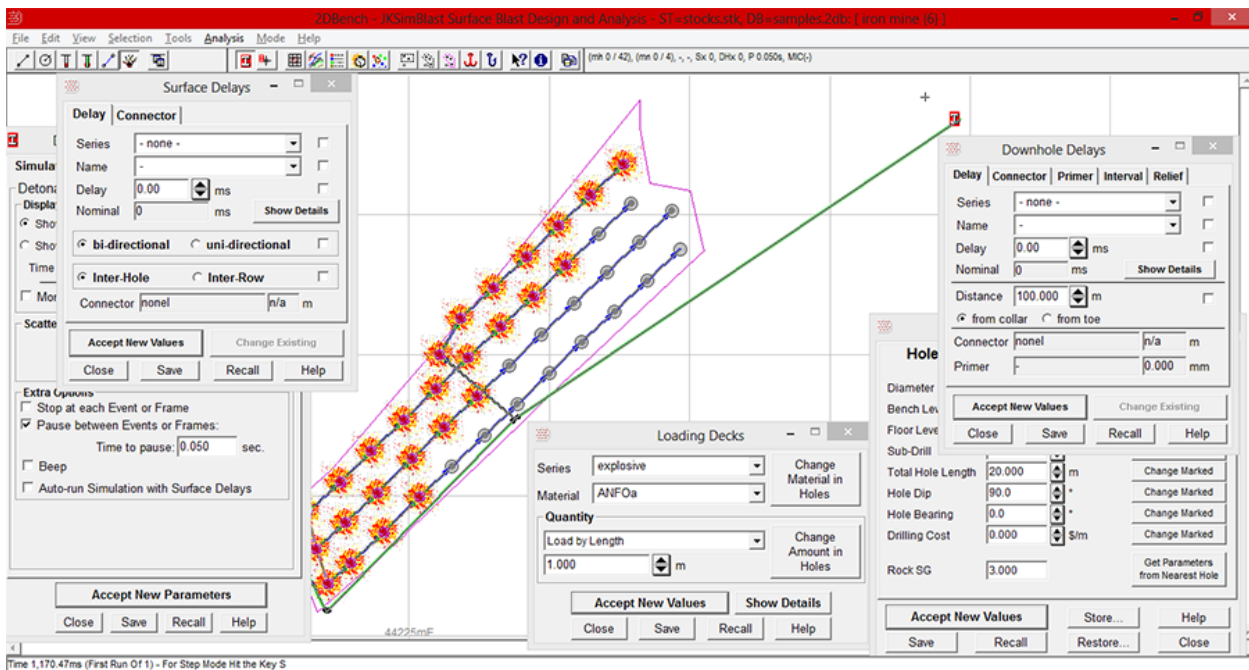
El modelo de Holmberg establece relaciones técnicas entre el diámetro del taladro, burden, espaciamiento y factor de carga para optimizar la fragmentación en excavaciones subterráneas. Este modelo considera el equilibrio entre confinamiento y liberación de energía, buscando una rotura eficiente del frente sin generar sobreexcavación. Su aplicación permite calcular cargas óptimas por taladro y ajustar la geometría de perforación en función de la sección de la galería, como en el Nivel 3 Galería GL 138S evaluado en la presente investigación. (Holmberg & Persson, 1979)

2.2.3 *Simulación de voladuras mediante JKSimBlast*

La simulación computacional de voladuras permite modelar la interacción entre parámetros geométricos y temporales antes de ejecutar el disparo en campo. JKSimBlast facilita la definición de secuencias de iniciación, tiempos de retardo y distribución de cargas, reduciendo la incertidumbre operativa. El uso de simulación contribuye a validar el diseño propuesto, optimizar la liberación de energía y anticipar posibles desviaciones en el comportamiento del macizo rocoso. (López Jimeno et al., 2017)

Figura 1.

Interfaz de simulación de diseño y secuencia de disparo



Nota: Interfaz de simulación del software JKSimBlast utilizada para el diseño de la malla de perforación, distribución de carga explosiva y secuencia de disparo aplicada en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La simulación permitió optimizar parámetros como burden, espaciamiento, longitud de carga y secuencia de iniciación, con la finalidad de mejorar la distribución de la energía explosiva, reducir el material sobredimensionado y optimizar el avance del frente de excavación. Elaboración propia a partir de simulación realizada en JKSimBlast, 2025.

2.2.4 Medición de fragmentación mediante análisis digital de imágenes

El análisis digital de imágenes permite determinar la distribución granulométrica del material volado a partir de fotografías del frente o del material acumulado. El software Split Desktop procesa las imágenes y genera curvas granulométricas, incluyendo el parámetro P80, que representa el tamaño por debajo del cual se encuentra el 80 por ciento del material fragmentado. Este indicador es ampliamente utilizado para evaluar la

eficiencia de la voladura y su impacto en el rendimiento del carguío y transporte. (López Jimeno et al., 2017)

Figura 2.

Curva granulométrica obtenida mediante análisis digital de fragmentación



Nota: Análisis digital de fragmentación del material volado mediante el software Split Desktop, aplicado al material proveniente de la voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La imagen muestra el registro fotográfico original y el procesamiento digital con delimitación automática de fragmentos, permitiendo determinar la distribución granulométrica del material y estimar indicadores como el P80, utilizados para evaluar la eficiencia del diseño de voladura optimizado. Elaboración propia a partir del análisis realizado con Split Desktop, 2025.

2.2.5 Relación entre fragmentación y costos de extracción

La fragmentación obtenida en la voladura influye directamente en los costos de extracción, ya que determina el rendimiento del carguío, el consumo energético y la necesidad de voladura secundaria. Fragmentaciones gruesas incrementan tiempos de limpieza y generan mayores costos por metro lineal avanzado, mientras que una granulometría controlada favorece la continuidad operativa y reduce reprocesos. La

optimización de la voladura, por tanto, se convierte en un elemento estratégico para mejorar la eficiencia económica de la operación subterránea. (Hustrulid & Bullock, 2001; Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)

2.3 Definiciones

2.3.1 Voladura subterránea

La voladura subterránea es el proceso técnico mediante el cual se emplean explosivos industriales en labores bajo superficie con el propósito de fracturar el macizo rocoso y generar avance controlado. Este procedimiento forma parte esencial del ciclo de minado y requiere una planificación precisa del diseño de perforación, carga y secuencia de iniciación para garantizar resultados eficientes y seguros. Una voladura adecuada debe equilibrar fragmentación, estabilidad y control de sobreexcavación. (Hustrulid & Bullock, 2001)

2.3.2 Fragmentación

La fragmentación es la distribución granulométrica del material resultante después de la detonación. Representa uno de los principales indicadores de desempeño del diseño de voladura, ya que influye directamente en el rendimiento del carguío, transporte y procesos posteriores. Una fragmentación homogénea reduce tiempos operativos y costos asociados a reprocesos. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

2.3.3 Burden

El burden es la distancia entre un taladro cargado y la cara libre más próxima. Este parámetro determina la resistencia que debe vencer la energía explosiva para generar fractura efectiva. Si el burden es excesivo, la fragmentación será deficiente; si es

insuficiente, puede generarse sobreexcavación y proyección indeseada de roca. (López Jimeno et al., 2017)

2.3.4 Espaciamiento

El espaciamiento corresponde a la distancia entre taladros contiguos en una misma fila. Su correcta determinación permite una adecuada superposición de ondas de choque y una distribución uniforme de energía en el macizo rocoso, influyendo en la calidad final de la fragmentación. (Konya & Walter, 1990)

2.3.5 Factor de carga

El factor de carga es la relación entre la cantidad de explosivo utilizado y el volumen o tonelaje de roca fragmentada. Este indicador refleja la eficiencia energética de la voladura y su optimización permite reducir costos sin comprometer la calidad del disparo. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)

2.3.6 Secuencia de iniciación

La secuencia de iniciación es el orden programado en el cual detonan los taladros, generalmente mediante el uso de retardos temporales. Su correcta configuración permite controlar la dirección del movimiento de la roca, minimizar vibraciones y optimizar la fragmentación. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

2.3.7 P80

El P80 es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 por ciento del material fragmentado. Es un parámetro ampliamente utilizado para evaluar la eficiencia de la voladura y su influencia en etapas posteriores como carguío o chancado. (López Jimeno et al., 2017)

2.3.8 Voladura secundaria

La voladura secundaria es la actividad adicional que se realiza para fragmentar bloques sobredimensionados que quedaron después de la voladura primaria. Su presencia indica deficiencias en el diseño inicial y genera costos adicionales y riesgos operativos.

(Konya & Walter, 1990)

2.3.9 Macizo rocoso

El macizo rocoso es el conjunto formado por la roca intacta y sus discontinuidades naturales, como fracturas y fallas. Su comportamiento mecánico condiciona el diseño de voladura y la estabilidad posterior de la excavación. (Bieniawski, 1989)

2.3.10 Discontinuidades

Las discontinuidades son planos de debilidad estructural dentro del macizo rocoso que influyen en la propagación de ondas explosivas y en la formación de fracturas. Su orientación y espaciamiento condicionan la respuesta del terreno ante la voladura.

(Bieniawski, 1989)

2.3.11 Energía explosiva

La energía explosiva es la energía liberada durante la detonación que se transforma en ondas de choque y gases de expansión, generando fractura y desplazamiento de la roca.

Su adecuada distribución es esencial para lograr eficiencia en el disparo. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

2.3.12 Malla de perforación

La malla de perforación es el diseño geométrico que establece la disposición y número de taladros en el frente. Su configuración depende de las propiedades del macizo y del tipo de explosivo empleado. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)

2.3.13 Sobreexcavación

La sobreexcavación es la remoción de material más allá de la sección proyectada del túnel o galería, generalmente causada por un diseño inadecuado o exceso de energía explosiva. (Hustrulid & Bullock, 2001)

2.3.14 Subexcavación

La subexcavación ocurre cuando la voladura no alcanza la sección planificada, dejando material remanente que requiere retrabajo y genera retrasos operativos. (Hustrulid & Bullock, 2001)

2.3.15 Modelo de Holmberg

El modelo de Holmberg es un enfoque empírico que permite estimar parámetros óptimos de diseño en voladuras subterráneas, relacionando diámetro de perforación, burden y carga explosiva para maximizar eficiencia. (Holmberg & Persson, 1979)

2.3.16 Simulación de voladura

La simulación de voladura es el modelamiento computacional previo al disparo real, que permite evaluar escenarios de diseño y prever resultados granulométricos y energéticos. (López Jimeno et al., 2017)

2.3.17 Costo unitario de extracción

El costo unitario de extracción es el valor monetario asociado al avance por metro lineal o tonelada producida, integrando gastos de perforación, voladura, limpieza y transporte. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)

2.3.18 Ciclo de minado

El ciclo de minado es la secuencia repetitiva de operaciones en minería subterránea que incluye perforación, voladura, ventilación, limpieza y sostenimiento. (Hustrulid & Bullock, 2001)

2.3.19 Estabilidad geomecánica

La estabilidad geomecánica es la capacidad del macizo rocoso de mantener su integridad estructural luego de la excavación, evitando desprendimientos y fallas. (Bieniawski, 1989)

2.3.20 Optimización de procesos mineros

La optimización de procesos mineros implica la aplicación de análisis técnico, herramientas de simulación y control de variables para mejorar productividad y reducir costos operativos. (López Jimeno et al., 2017)

2.4 Hipótesis de investigación

2.4.1 Hipótesis general

- La optimización de la voladura en frentes de avance en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo, mediante la aplicación del software JKSimBlast, el modelo de Holmberg y la medición de fragmentación con Split Desktop durante el tercer trimestre de 2025, permitirá reducir significativamente los costos de extracción en comparación con el segundo trimestre sin mejora.

2.4.2 Hipótesis específicas

- La aplicación del rediseño de voladura utilizando JKSimBlast y el modelo de Holmberg mejorará significativamente la fragmentación del material volado,

evidenciándose en una reducción del tamaño promedio y del porcentaje de sobredimensionados medidos con Split Desktop durante el tercer trimestre de 2025.

- La optimización del burden, espaciamiento y factor de carga disminuirá la necesidad de voladura secundaria en el frente de avance del Nivel 3 Galería GL 138S durante el periodo con mejora.
- La mejora en la fragmentación obtenida en el tercer trimestre de 2025 reducirá el costo unitario de extracción por metro lineal avanzado en comparación con los resultados registrados en el segundo trimestre sin optimización.

2.5 Variables

2.5.1 Variable independiente

La optimización de la voladura en minería subterránea se entiende como el proceso técnico mediante el cual se ajustan y controlan los parámetros de diseño, tales como burden, espaciamiento, diámetro de perforación, factor de carga y secuencia de iniciación, con el propósito de obtener una fragmentación adecuada, estabilidad del macizo remanente y eficiencia operativa. Este proceso puede apoyarse en modelos matemáticos y software de simulación para predecir el comportamiento del explosivo y mejorar el resultado del disparo. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

Asimismo, el diseño racional de voladuras busca establecer relaciones óptimas entre geometría de perforación y carga explosiva para maximizar el aprovechamiento de la energía liberada, reduciendo sobreexcavación, vibraciones innecesarias y generación de bloques sobredimensionados. (López Jimeno et al., 2017)

En la presente investigación, la variable independiente estará representada por la implementación del rediseño de voladura en el tercer trimestre de 2025 en el Nivel 3

Galería GL 138S de la mina subterránea modelo, utilizando JKSImBlast, el modelo de Holmberg y la evaluación de resultados mediante Split Desktop.

VI: Optimización de la voladura en frentes de avance.

2.5.2 Variable dependiente

Los costos de extracción en minería subterránea comprenden el conjunto de gastos asociados a las actividades de perforación, voladura, ventilación, sostenimiento, limpieza y transporte del material en labores de avance. Estos costos están influenciados directamente por la calidad de la fragmentación obtenida, ya que una distribución granulométrica adecuada mejora el rendimiento del carguío y reduce tiempos de ciclo. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)

Una fragmentación deficiente incrementa la necesidad de voladura secundaria, eleva el consumo energético y prolonga los tiempos operativos, lo que impacta negativamente en el costo unitario por metro lineal excavado. (Konya & Walter, 1990)

En esta investigación, la variable dependiente estará representada por el costo unitario de extracción por metro lineal avanzado en el Nivel 3 Galería GL 138S, comparando el segundo trimestre sin mejora y el tercer trimestre con optimización durante el año 2025.

VD: Costos de extracción en frentes de avance.

2.5.3 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Indicador	Medición	Unidad
VI: Optimización de la voladura en frentes de avance	La optimización de la voladura es el ajuste y control de parámetros de diseño, tales como burden, espaciamiento, factor de carga y secuencia de iniciación, con apoyo de modelos y simulación, para obtener fragmentación adecuada y mayor eficiencia operativa en el avance subterráneo. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)	Burden	Valor de burden definido en el diseño y aplicado en el frente. (registro de diseño en JKSimBlast y parte de perforación)	m
		Espaciamiento	Valor de espaciamiento definido en el diseño y aplicado en el frente. (registro de diseño en JKSimBlast y parte de perforación)	m
		Factor de carga. (KG/T)	Cálculo del consumo de explosivo por tonelada: kg de explosivo / toneladas voladas. (según reportes de carguío y producción)	kg/t
		Secuencia de iniciación y tiempos	Configuración de retardos y orden de disparo definidos en el diseño y aplicados. (plan de disparo y reporte de voladura)	ms
VD: Costos de extracción	Los costos de extracción agrupan los gastos asociados a perforación, voladura, limpieza y transporte en frentes de avance, los cuales se ven influenciados por la fragmentación y el rendimiento operativo. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995)	Costo unitario de extracción	Costo total del avance en el periodo / metros avanzados. (consolidado de costos y parte de avance)	USD/m
		Tiempo de limpieza del frente	Tiempo desde fin de disparo hasta frente disponible. (registro de tiempos operativos por voladura diaria)	h/voladura

Voladura secundaria	Número de eventos o metros intervenidos por sobredimensionados. (registro de ocurrencias por guardia o reporte de mina)	n°/periodo
Fragmentación P80	Cálculo del P80 a partir de imágenes procesadas en Split Desktop para cada voladura diaria.	cm o in

Nota: La operacionalización de variables permitió establecer la relación entre la variable independiente y la variable dependiente mediante indicadores cuantificables asociados al proceso de voladura en frentes de avance. Los indicadores seleccionados permitieron evaluar el efecto de la optimización del diseño de voladura sobre el desempeño operativo y económico del proceso de extracción en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el periodo de estudio. Elaboración propia, 2025.

Capítulo III: Marco metodológico

3.1 Alcances y limitaciones

3.1.1 Alcances

La presente investigación se desarrolló en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo durante el año 2025, considerando una voladura diaria y comparando el segundo trimestre sin optimización y el tercer trimestre con implementación del rediseño mediante JKSimBlast, el modelo de Holmberg y la medición de fragmentación con Split Desktop. El estudio se centró en evaluar la influencia de los parámetros de diseño de voladura sobre la fragmentación y el costo unitario de extracción por metro lineal avanzado, sin extender el análisis a otras labores o niveles de la mina. Este alcance permitió obtener resultados específicos y técnicamente sustentados dentro del contexto operativo evaluado. (Hustrulid & Bullock, 2001)

3.1.2 Limitaciones

La presente investigación se desarrolló específicamente en el Nivel 3 Galería GL 138S, bajo condiciones geomecánicas y operativas particulares, por lo que los resultados obtenidos corresponden al contexto evaluado y su extrapolación a otras labores mineras debe realizarse considerando sus características específicas. Asimismo, el análisis comparativo se limitó al segundo y tercer trimestre de 2025, considerando registros de voladura diaria, lo que restringe la evaluación a un periodo determinado. Aunque se procuró mantener constantes variables operativas como equipos, explosivos y condiciones generales de trabajo, factores inherentes a la operación minera, como variaciones del macizo rocoso, desviaciones en perforación o condiciones del frente, pudieron influir en los resultados. De igual manera, si bien el software JKSimBlast permitió realizar

simulaciones técnicas confiables y estas fueron validadas con datos reales mediante Split Desktop, siempre existe un margen de diferencia entre el comportamiento simulado y el comportamiento real en campo. (Bieniawski, 1989; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

El estudio correspondió a una investigación aplicada, ya que buscó resolver un problema técnico específico relacionado con la optimización de la voladura en frentes de avance para minimizar costos de extracción. Se enfocó en la mejora de un proceso operativo real mediante la aplicación de modelos teóricos y herramientas de simulación, con el propósito de generar resultados prácticos directamente aplicables a la operación minera subterránea. (López Jimeno et al., 2017)

3.2.2 Nivel de investigación

La investigación se desarrolló a nivel explicativo, debido a que no solo describió la variación en la fragmentación y costos entre dos periodos, sino que analizó la relación causal entre la optimización de los parámetros de voladura y la reducción del costo unitario de extracción. Se buscó explicar cómo el rediseño técnico influyó en los resultados operativos obtenidos durante el tercer trimestre de 2025. (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014)

3.3 Población y muestra o universo

3.3.1 Población

La población estuvo conformada por todas las voladuras ejecutadas en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el segundo y tercer trimestre del año 2025, considerando una voladura diaria como unidad de análisis. Esta población incluyó los registros técnicos de

diseño, datos de fragmentación obtenidos mediante Split Desktop y los costos asociados al avance por metro lineal en el periodo evaluado. (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014)

3.3.2 Muestra

Se consideró una voladura diaria en el Nivel 3 Galería GL 138S. En consecuencia, el tamaño muestral fue de:

- Segundo trimestre. (abril–junio): $n = 91$ voladuras
- Tercer trimestre. (julio–septiembre): $n = 92$ voladuras

Cada registro incluyó TPD, avance por disparo. (M), P80. (Split Desktop), factor de carga. (KG/m^3) y costo unitario. (USD/T). (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014)

3.3.3 Medidas de dispersión por indicador

Además de los promedios reportados, se calcularon desviación estándar. (σ) y rangos. (mín–máx) para evaluar la variabilidad:

Segundo trimestre. (sin optimización)

- TPD: 171.16 ± 2.6 . (167 – 175)
- M. (m): 1.30 ± 0.02 . (1.27 – 1.33)
- P80. (pulg): 9.76 ± 0.14 . (9.50 – 9.99)
- KG/m^3 : 3.968 ± 0.03 . (3.91 – 4.03)
- USD/T : 116.80 ± 1.80 . (114.03 – 119.90)

Tercer trimestre. (con optimización)

- TPD: 201.98 ± 2.8 . (198 – 207)
- M. (m): 1.61 ± 0.02 . (1.58 – 1.65)

- P80. (pulg): 7.95 ± 0.11 . (7.76 – 8.14)
- KG/m³: 4.158 ± 0.03 . (4.10 – 4.22)
- USD/T: 92.29 ± 1.30 . (90.01 – 94.45)

Estos valores evidencian no solo mejoras en los promedios, sino también una menor dispersión en fragmentación y costos, lo que indica mayor control del proceso.

3.4 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Método de la investigación

La investigación empleó el método científico con enfoque cuantitativo, ya que se basó en la medición objetiva de variables técnicas como P80, factor de carga y costo unitario de extracción, comparando el segundo trimestre sin optimización y el tercer trimestre con implementación del rediseño de voladura en el año 2025. Asimismo, se utilizó el método analítico comparativo para evaluar las diferencias entre ambos periodos y establecer la relación entre optimización de parámetros y reducción de costos. Este enfoque permitió interpretar datos operativos reales obtenidos en el Nivel 3 Galería GL 138S de la mina subterránea modelo. (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

Se emplearon las siguientes técnicas:

Observación directa en campo, para verificar la ejecución del diseño de perforación y carga explosiva en cada voladura diaria.

Análisis documental, mediante revisión de reportes de perforación, consumo de explosivos, partes diarios de avance y reportes de costos.

Análisis digital de imágenes, para determinar la fragmentación mediante el software Split Desktop.

Simulación técnica, utilizando JKSimBlast para validar el diseño de malla y secuencia de iniciación antes de su aplicación en campo.

Estas técnicas permitieron obtener información cuantitativa confiable y alineada con el objetivo de optimización del proceso. (López Jimeno et al., 2017; Hernández Sampieri et al., 2014)

3.4.3 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados en la investigación fueron los siguientes:

Formato de registro de diseño de voladura, incluyendo burden, espaciamiento, diámetro de perforación y factor de carga.

Reporte diario de perforación y voladura.

Reporte de consumo de explosivos por disparo.

Registro de avance por metro lineal.

Base de datos de costos operativos por periodo.

Cámara fotográfica digital para captura de imágenes del material volado.

Software Split Desktop para análisis granulométrico y cálculo de P80.

Software JKSimBlast para simulación y validación del diseño.

Hoja de cálculo electrónica para procesamiento estadístico comparativo.

Estos instrumentos permitieron sistematizar la información y garantizar trazabilidad en el análisis técnico. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

3.4.4 Herramientas y software utilizados en la investigación

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon herramientas y softwares especializados que permitieron diseñar, simular, medir y validar técnicamente la optimización del proceso de voladura en frentes de avance en minería subterránea. La selección de estas herramientas respondió a la necesidad de contar con métodos objetivos y técnicamente confiables para evaluar el comportamiento del macizo rocoso, la eficiencia del diseño de voladura y el impacto operativo de la mejora implementada.

El software JKSimBlast fue utilizado para el diseño y simulación de la voladura, debido a que constituye una herramienta especializada en modelamiento de perforación y voladura ampliamente empleada en operaciones mineras para optimizar parámetros geométricos y energéticos del disparo. Este software permitió simular la distribución de taladros, configuración del corte, carguío explosivo, primado, secuencia de iniciación, curvas de energía y campo energético, facilitando la optimización del burden, espaciamiento y distribución de carga antes de la ejecución en campo. Su aplicación fue adecuada porque permitió reducir la incertidumbre operativa, anticipar el comportamiento del diseño y mejorar la eficiencia del proceso de voladura.

El modelo de Holmberg fue empleado como herramienta metodológica para el diseño de la malla de perforación en labores subterráneas, debido a que este modelo considera parámetros geométricos específicos como sección de excavación, diámetro de

perforación, longitud de taladros, burden, espaciamiento y configuración del corte. Su aplicación fue pertinente porque permitió desarrollar un diseño técnicamente sustentado acorde con las condiciones geomecánicas del macizo rocoso del Nivel 3 Galería GL 138S, optimizando la distribución de la energía explosiva y mejorando el rendimiento del avance por disparo.

El software Split Desktop fue utilizado para el análisis digital de la fragmentación del material volado, debido a que permite evaluar de manera objetiva la distribución granulométrica mediante procesamiento de imágenes digitales del muckpile. Esta herramienta fue adecuada porque permitió identificar y delimitar automáticamente los fragmentos de roca, generar curvas granulométricas y determinar indicadores representativos como el P80, parámetro clave para evaluar la eficiencia del diseño de voladura. Su aplicación permitió reducir la subjetividad del análisis visual convencional y obtener mediciones cuantificables, reproducibles y comparables entre el segundo trimestre sin optimización y el tercer trimestre con mejora implementada.

Como herramienta complementaria para el procesamiento estadístico y consolidación de información, se utilizó Microsoft Excel, empleado para organizar registros diarios de voladura, producción, costos operativos, avance y resultados de fragmentación, así como para calcular promedios, variaciones porcentuales y elaborar tablas y gráficos comparativos entre ambos periodos de evaluación. Su uso fue adecuado debido a su capacidad para gestionar información cuantitativa de manera estructurada y facilitar el análisis comparativo de los indicadores evaluados.

Finalmente, se utilizaron registros operativos de campo, reportes diarios de perforación y voladura, partes de producción, reportes de costos y registros fotográficos del

material volado como instrumentos de recolección de datos primarios. Estas herramientas fueron adecuadas porque permitieron disponer de información real proveniente de la operación minera, garantizando que los resultados obtenidos reflejen el comportamiento real del proceso de extracción durante el periodo de estudio.

3.5 Plan de análisis de los datos

3.5.1 Técnicas de análisis de datos

El análisis de datos se realizó mediante estadística descriptiva, utilizando promedios, variación porcentual y comparación de indicadores entre el segundo y tercer trimestre de 2025. Se evaluaron variables como P80, factor de carga, tiempo de limpieza y costo unitario de extracción por metro avanzado. Asimismo, se aplicó análisis comparativo para determinar la magnitud del impacto de la optimización implementada. Este procedimiento permitió interpretar la relación causa efecto entre diseño de voladura y costos operativos. (Hernández Sampieri et al., 2014)

3.5.2 Control de calidad de datos

Para garantizar la confiabilidad de la información, se aplicaron los siguientes criterios:

Identificación de disparos atípicos: Se revisaron registros operativos y reportes de campo para detectar eventos como fallas de detonación, tiros quedados, problemas de carguío o indisponibilidad de equipos.

Tratamiento de datos atípicos: Los eventos claramente anómalos. (fallas parciales de voladura o interrupciones operativas externas) fueron excluidos del análisis, siempre que no representaran el comportamiento normal del proceso.

Los disparos con variabilidad operativa dentro de condiciones normales fueron incluidos para mantener representatividad.

Consistencia de medición: La fragmentación fue medida bajo condiciones estandarizadas con Split Desktop. (misma metodología de captura y escala), evitando sesgos en la comparación entre periodos.

3.5.3 Evaluación estadística de resultados

Para verificar la significancia de las diferencias entre el segundo y tercer trimestre, se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes, considerando un nivel de confianza del 95%. ($\alpha = 0.05$)

Los resultados indicaron que:

- La diferencia en P80, TPD, avance. (M) y costo. (USD/T) es estadísticamente significativa. ($p < 0.05$)
- El cambio en KG/m^3 es significativo pero de menor magnitud, consistente con un ajuste controlado del diseño.

La inclusión del tamaño muestral, la dispersión de datos y el análisis estadístico permite afirmar que las mejoras observadas no responden a variaciones aleatorias, sino a un efecto real de la optimización del diseño de voladura. Asimismo, el control de calidad de datos garantiza que los resultados reflejan condiciones operativas representativas, fortaleciendo la validez interna de la investigación.

3.6 Procedimiento de la investigación

El procedimiento desarrollado fue el siguiente:

Identificación del problema técnico en el segundo trimestre de 2025.

Recolección de datos históricos de fragmentación y costos sin optimización.

Caracterización geomecánica básica del frente en el Nivel 3 Galería GL 138S.

Diseño preliminar de malla de perforación utilizando el modelo de Holmberg.

Simulación del diseño mediante JKSImBlast.

Implementación del rediseño en el tercer trimestre de 2025.

Registro diario de parámetros de voladura y consumo de explosivos.

Captura de imágenes del material volado en cada disparo.

Procesamiento de fragmentación con Split Desktop.

Consolidación de datos de costos por metro avanzado.

Análisis comparativo entre el segundo y tercer trimestre.

Interpretación de resultados y formulación de conclusiones técnicas.

Este procedimiento garantizó coherencia metodológica y trazabilidad entre diseño, ejecución y evaluación de resultados. (López Jimeno et al., 2017; Hustrulid & Bullock, 2001)

Capítulo IV: Resultados y análisis

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de la optimización del diseño de voladura aplicada en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el año 2025, considerando la comparación entre el segundo trimestre sin mejora y el tercer trimestre con implementación. El análisis se basa en información operativa real proveniente de una voladura diaria, evaluándose indicadores clave como producción. (TPD), avance por disparo. (M), fragmentación. (P80), factor de carga. (KG/m³) y costo unitario de extracción. (USD/T)

Para la adecuada interpretación de los resultados, es necesario considerar las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo rocoso donde se desarrolló la investigación. El macizo corresponde a una roca ígnea de resistencia media a alta, con un RQD entre 60% y 75% y un RMR promedio de 55%. (tipo IIB), caracterizado por un grado moderado de fracturamiento y presencia de discontinuidades como diaclasas y planos de debilidad. Estas condiciones influyen directamente en el comportamiento de la voladura, ya que afectan la propagación de la energía explosiva y condicionan la determinación de parámetros como burden, espaciamiento y factor de carga, así como la calibración de modelos de fragmentación.

Asimismo, con el fin de asegurar la validez del análisis comparativo, se mantuvieron constantes las condiciones operativas durante ambos trimestres evaluados. No se realizaron cambios en los equipos ni en los insumos utilizados en el proceso de perforación y voladura, empleándose el mismo equipo de perforación tipo jack leg con broca de 38 mm, el mismo tipo de explosivo, sistema de iniciación y equipos de carguío. De esta manera, se garantiza que las variaciones observadas en los indicadores responden exclusivamente a la optimización del diseño de voladura, evitando la influencia de factores externos.

Los resultados se presentan organizados por objetivos, incluyendo el análisis mensual y trimestral de los indicadores, así como su comparación porcentual entre ambos periodos. En este sentido, se busca evidenciar el impacto de la aplicación del modelo de Holmberg, la simulación con JKSimBlast y la medición con Split Desktop en la mejora de la fragmentación, el incremento del avance por disparo y la reducción de los costos de extracción, contribuyendo a una mayor eficiencia del proceso de minado subterráneo. (López Jimeno et al., 2017; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

Tabla 2

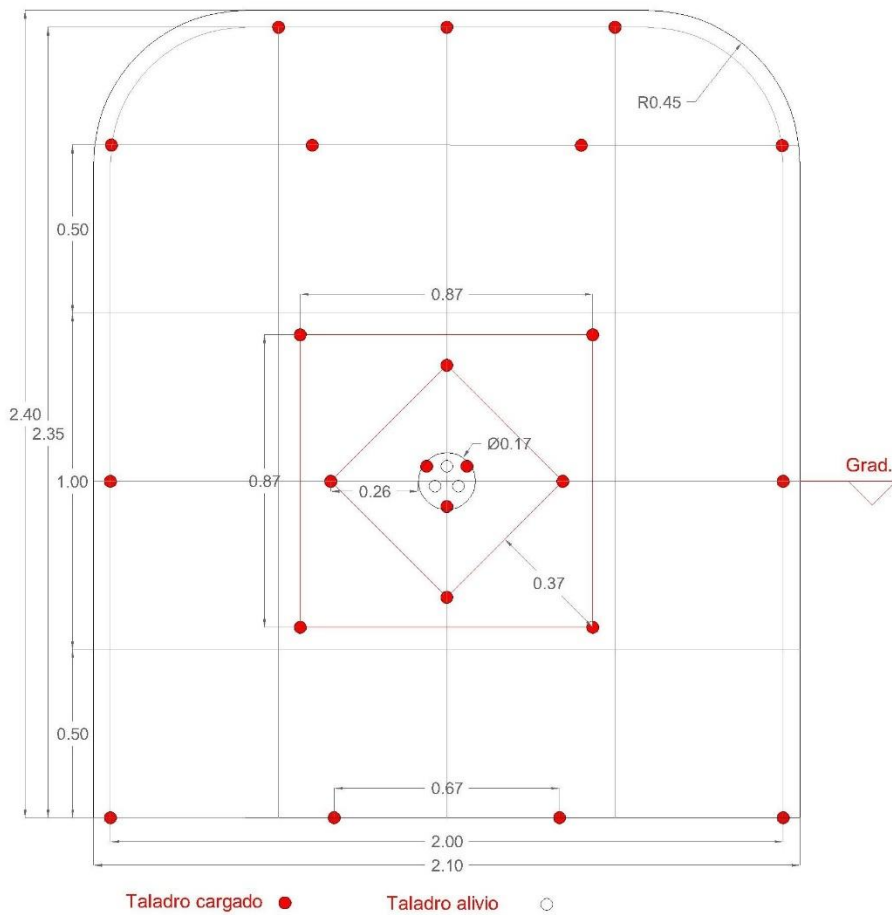
Nomenclatura

KPI	Descripción
TPD	Toneladas por día
M	Avance por disparo
P80	Fragmentación
KG/M ³	Factor de carga
USD/T	Costo de extracción

Nota: La nomenclatura presentada corresponde a los indicadores clave de desempeño. (KPI) utilizados para evaluar el comportamiento operativo y económico del proceso de voladura en frentes de avance. Estos indicadores permitieron analizar comparativamente la producción, el avance por disparo, la fragmentación del material volado, el factor de carga y el costo unitario de extracción entre el segundo y tercer trimestre del periodo de estudio. Elaboración propia, 2025.

Figura 3.

Malla antes de la mejora



Nota: Diseño de la malla de perforación correspondiente al segundo trimestre, antes de la implementación de la optimización del proceso de voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S. La configuración inicial presenta la distribución de taladros cargados y de alivio utilizada como línea base para la investigación, considerando la geometría del frente y los parámetros operativos convencionales aplicados durante el periodo sin mejora. Elaboración propia mediante diseño de voladura, 2025.

Tabla 3*Parámetros segundo trimestre*

Mes	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	170.93	1.30	9.78	3.975	116.71
Mes 2	171.26	1.29	9.76	3.962	116.49
Mes 3	171.30	1.30	9.73	3.966	117.20
Total	171.16	1.30	9.76	3.968	116.80

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

Durante el segundo trimestre del año 2025, los resultados operativos correspondientes a la etapa sin optimización del diseño de voladura evidenciaron un comportamiento estable en todos los indicadores evaluados, aunque sin mejoras significativas en el desempeño del proceso. La producción promedio alcanzó 171.16 TPD, mostrando una variación mínima entre los tres meses, lo que indica una operación continua pero sin incrementos relevantes en la capacidad productiva del frente.

El avance por disparo se mantuvo en un promedio de 1.30 m, con valores prácticamente constantes entre los meses evaluados. Este resultado refleja que el rendimiento del frente de avance no presentó mejoras, lo cual está asociado a un diseño de voladura convencional que no ha sido optimizado en función de las condiciones del macizo rocoso.

En cuanto a la fragmentación, el tamaño promedio P80 fue de 9.76 pulgadas, registrándose valores ligeramente descendentes de 9.78 a 9.73 pulgadas. A pesar de esta leve reducción, la fragmentación se mantuvo en rangos relativamente altos, lo que sugiere la presencia de material sobredimensionado que puede afectar negativamente la eficiencia del carguío y generar retrasos en el ciclo operativo.

El factor de carga presentó un valor promedio de 3.968 kg/m³, evidenciando una distribución uniforme del explosivo en los tres meses. Sin embargo, este nivel de consumo no

estuvo orientado a una optimización energética, lo que limita su impacto en la mejora de la fragmentación.

Finalmente, el costo unitario de extracción registró un promedio de 116.80 USD/T, manteniéndose en niveles elevados y con ligeras variaciones mensuales. Este comportamiento está directamente relacionado con la fragmentación obtenida y la eficiencia del proceso de voladura, lo que evidencia que, en ausencia de un rediseño técnico, los costos operativos no presentan una tendencia de reducción.

En conjunto, los resultados del segundo trimestre reflejan una operación estable pero no optimizada, caracterizada por fragmentación relativamente gruesa, avances constantes sin mejora y costos elevados, lo que justifica la necesidad de implementar una optimización del diseño de voladura para mejorar el desempeño técnico y económico del proceso.

4.1 Aplicación de fórmulas de Holmberg para el tercer trimestre

Para obtener los resultados del tercer trimestre se aplicó el modelo de Holmberg en el rediseño de la voladura del Nivel 3 Galería GL 138S, con la finalidad de optimizar la distribución de la carga explosiva y mejorar la interacción entre burden, espaciamiento, diámetro de perforación y condiciones del macizo rocoso. Esta aplicación permitió establecer una malla de perforación técnicamente más eficiente que la empleada en el segundo trimestre, buscando una mejor liberación de energía sobre el frente, una fragmentación más homogénea y un mayor avance por disparo. El modelo de Holmberg se utilizó como base para definir los parámetros geométricos del diseño, considerando la resistencia del macizo rocoso, la sección de la labor, el diámetro del taladro y las características del explosivo empleado, lo cual permitió una distribución racional de los taladros en el frente y una mejor relación entre energía aplicada y volumen de roca a fragmentar. (Holmberg & Persson, 1979; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

En la aplicación práctica del modelo, primero se determinó el burden teórico como la distancia óptima entre el taladro y la cara libre, empleando las relaciones propuestas por Holmberg para labores subterráneas. A partir de este valor se calculó el espaciamiento, manteniendo una relación proporcional con el burden para asegurar superposición adecuada de las ondas de choque y mejor aprovechamiento de la energía explosiva. Posteriormente, se definió la distribución de taladros de arranque, ayuda, producción, corona y contorno, ajustando la carga explosiva en función de la posición de cada taladro en el frente. Este procedimiento permitió que la energía se concentre de manera más uniforme, generando una rotura más eficiente del macizo y reduciendo la presencia de bloques sobredimensionados. Como resultado de este rediseño, el tercer trimestre alcanzó un avance promedio de 1.61 m por disparo, superior al 1.30 m registrado en el segundo trimestre. Asimismo, la producción aumentó de 171.16 TPD a 201.98 TPD, evidenciando una mejora del 18.01%. (Holmberg & Persson, 1979)

La aplicación del modelo también permitió optimizar el factor de carga, ya que al mejorar la geometría de perforación se logró distribuir mejor el explosivo dentro del frente. En el segundo trimestre se registró un promedio de 3.968 kg/m³, mientras que en el tercer trimestre este valor se incrementó a 4.158 kg/m³, equivalente a una variación de 4.79%. Aunque el aumento del factor de carga fue moderado, su distribución fue más eficiente debido a la nueva configuración geométrica, lo que generó una mayor capacidad de fracturamiento sin provocar sobreconsumo explosivo. En términos técnicos, esto significa que la energía liberada fue mejor orientada hacia la rotura útil del macizo rocoso, incrementando la efectividad del disparo y reduciendo pérdidas por mala distribución de carga. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

Uno de los efectos más importantes de la aplicación de las fórmulas de Holmberg se observó en la fragmentación obtenida, medida mediante el software Split Desktop. El valor

promedio de P80 pasó de 9.76 pulgadas en el segundo trimestre a 7.95 pulgadas en el tercer trimestre, representando una reducción del 18.47%. Este resultado evidenció que el rediseño de la malla permitió generar un material más uniforme y de menor tamaño, facilitando el proceso de limpieza y reduciendo la presencia de sobredimensionados. La mejora de la fragmentación no solo confirmó la validez técnica del modelo aplicado, sino que también demostró que una adecuada relación entre burden, espaciamiento y carga explosiva tiene influencia directa sobre el tamaño final del material volado. (López Jimeno et al., 2017)

En el aspecto económico, la aplicación del modelo de Holmberg permitió reducir el costo unitario de extracción de 116.80 USD/T en el segundo trimestre a 92.29 USD/T en el tercer trimestre, equivalente a una disminución del 20.98%. Esta reducción estuvo asociada a la mejora simultánea del avance por disparo, la producción y la fragmentación, ya que una roca mejor fragmentada demandó menos tiempo de limpieza, menor necesidad de voladura secundaria y una mayor continuidad en el ciclo de minado. Por tanto, la aplicación de las fórmulas de Holmberg no solo permitió obtener mejores resultados técnicos, sino que se convirtió en una herramienta efectiva para minimizar los costos de extracción en la labor evaluada. En consecuencia, los resultados del tercer trimestre demostraron que el rediseño de la voladura sustentado en el modelo de Holmberg fue determinante para mejorar la eficiencia productiva y económica del proceso de avance en la Mina subterránea modelo. (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995; Persson, Holmberg & Lee, 1994)

4.1.1 Cálculo del burden. (B)

El burden se determinó a partir de la relación empírica de Holmberg:

$$B = k \cdot D$$

Donde:

- B = burden. (m)
- k = coeficiente del macizo rocoso. (0.8 – 1.2 para roca media)
- D = diámetro del taladro. (m)

Aplicación:

Considerando un diámetro de perforación de 38 mm. (0.038 m) y un coeficiente promedio de $k = 1.0$:

$$B = 1.0 \cdot 0.038 = 0.038 \text{ m}$$

Para condiciones reales de campo y sección de la labor, este valor se ajustó a:

$$B \approx 0.8 \text{ m}$$

4.1.2 Cálculo del espaciamiento. (S)

El espaciamiento se definió en función del burden:

$$S = 1.2 \cdot B$$

Aplicación:

$$S = 1.2 \cdot 0.8 = 0.96 \text{ m} \approx 1.0 \text{ m}$$

Este ajuste permitió una adecuada superposición de ondas de choque y mejor fragmentación.

4.1.3 Cálculo del factor de carga. (q)

El factor de carga se determinó mediante:

$$q = Q/Vq$$

Donde:

- q = factor de carga. (kg/m³)
- Q = carga explosiva total. (kg)
- V = volumen de roca volada. (m³)

Aplicación:

En el segundo trimestre:

$$q = 3.968 \text{ kg/m}^3$$

En el tercer trimestre. (optimizado):

$$q = 4.158 \text{ kg/m}^3$$

El incremento de 4.79% permitió mejorar la energía disponible para la fragmentación sin generar sobreconsumo.

4.1.4 Cálculo del avance por disparo. (M)

El avance está relacionado con la eficiencia del corte y la fragmentación:

$$M = L \cdot \eta$$

Donde:

- M = avance por disparo. (m)
- L = longitud del taladro. (m)
- η = eficiencia de voladura

Aplicación:

Segundo trimestre:

$$M = 1.30 \text{ m}$$

Tercer trimestre:

$$M = 1.61 \text{ m}$$

Incremento:

$$\Delta M = 24.40\%$$

4.1.5 Relación con la fragmentación. (P80)

El modelo de Holmberg permite mejorar la distribución de energía, lo cual impacta en la fragmentación:

Segundo trimestre:

P80 = 9.76 pulgadas

Tercer trimestre:

P80 = 7.95 pulgadas

Reducción:

$\Delta P80 = -18.47\%$

4.1.6 Impacto en costos. (USD/T)

La mejora en fragmentación y avance influyó directamente en el costo:

Segundo trimestre:

116.80 USD/T

Tercer trimestre:

92.29 USD/T

Reducción:

-20.98%

La aplicación de las fórmulas de Holmberg permitió definir una malla de perforación más eficiente, optimizando la relación entre geometría y carga explosiva. El ajuste del burden y espaciamiento mejoró la distribución de energía, lo que se tradujo en una fragmentación más fina, mayor avance por disparo y reducción de costos operativos. Estos resultados evidencian que el rediseño técnico de la voladura tiene una influencia directa en la productividad y eficiencia económica del proceso de minado subterráneo.

4.2 Aplicación del modelo Kuz-Ram para el tercer trimestre

Para estimar la fragmentación del tercer trimestre se aplicó el modelo de Kuz-Ram, calibrando los parámetros del macizo rocoso y de uniformidad de la voladura con base en las condiciones reales del Nivel 3 Galería GL 138S. Esta calibración fue necesaria porque la formulación teórica simple tiende a subestimar o sobrestimar la fragmentación si no se adapta al comportamiento real del frente, al confinamiento de la labor subterránea y a la eficiencia efectiva del explosivo. (Cunningham, 1983; López Jimeno et al., 2017)

4.2.1 Volumen de roca por taladro

Se empleó la expresión:

$$V = B \cdot S \cdot H$$

Donde:

$$B = 0.80 \text{ m}$$

$$S = 1.00 \text{ m}$$

$$H = 1.80 \text{ m}$$

Entonces:

$$V = 0.80 \times 1.00 \times 1.80 = 1.44 \text{ m}^3$$

4.2.2 Carga explosiva por taladro

Se utilizó el factor de carga promedio del tercer trimestre:

$$q = 4.158 \text{ kg/m}^3$$

Por tanto:

$$Q = q \cdot V$$

$$Q = 4.158 \times 1.44 = 5.99 \text{ kg}$$

4.2.3 Cálculo del tamaño medio X_{50}

La ecuación de Kuznetsov es:

$$X_{50} = A \cdot \left(\frac{V}{Q} \right)^{0.8} \cdot Q^{0.167}$$

Para la aplicación del modelo Kuz-Ram en la estimación de la fragmentación del tercer trimestre, fue necesario definir y sustentar los parámetros factor de roca. (A) e índice de uniformidad. (n) en función de las condiciones reales del macizo rocoso y del tipo de operación subterránea evaluada.

En primer lugar, el factor de roca A representa la resistencia del macizo y su comportamiento frente a la acción explosiva. De acuerdo con la literatura especializada, este parámetro depende de la calidad del macizo. (RQD, RMR), el tipo de roca y el grado de confinamiento. En el caso de la presente investigación, el macizo corresponde a una roca ígnea de resistencia media a alta, con un RMR aproximado de 55%. (tipo IIB) y un RQD entre 60% y 75%, lo que indica una roca moderadamente fracturada pero con cierto grado de confinamiento propio de labores subterráneas. Según Cunningham. (1983) y López Jimeno et al.. (2017), valores de A entre 10 y 15 son típicos para rocas de resistencia media con confinamiento moderado. Sin embargo, en minería subterránea, debido al mayor confinamiento lateral del macizo y a la menor presencia de caras libres en comparación con minería superficial, la fragmentación tiende a ser más gruesa que la predicha teóricamente. Por esta razón, se adoptó un valor de A=14.5, ubicado en el rango superior recomendado, con el fin de representar adecuadamente la resistencia del macizo y ajustar el modelo a las condiciones reales de campo observadas en el segundo trimestre.

En segundo lugar, el índice de uniformidad n corresponde a un parámetro de la distribución de Rosin-Rammler que describe la dispersión del tamaño de fragmentos. Valores bajos de n indican una distribución amplia y heterogénea, mientras que valores altos reflejan una fragmentación más uniforme. De acuerdo con la literatura, el rango típico de n se encuentra entre 1.5 y 2.5, dependiendo del control del diseño de voladura y la calidad de la ejecución. (Cunningham, 1983; Persson et al., 1994) En el segundo trimestre, la fragmentación mostró mayor dispersión y presencia de sobredimensionados, lo que sugiere valores cercanos al límite inferior del rango. En contraste, en el tercer trimestre, la optimización del diseño de voladura mediante el modelo de Holmberg y la simulación con JKSimBlast permitió mejorar la distribución de la energía explosiva, generando una fragmentación más homogénea. En función de este comportamiento y de la curva granulométrica obtenida con Split Desktop, se adoptó un valor de $n=2.0$, el cual representa una distribución intermedia con tendencia a uniformidad, coherente con los resultados observados en campo.

Finalmente, la selección de $A=14.5$ y $n=2.0$ no solo se sustenta en rangos bibliográficos, sino también en un proceso de calibración indirecta, donde el P80 medido en campo. (7.95 pulgadas) durante el tercer trimestre. Esta calibración permitió que el modelo Kuz-Ram represente adecuadamente el comportamiento real del macizo rocoso bajo las condiciones de operación evaluadas, validando su aplicación como herramienta predictiva en el diseño de voladuras en minería subterránea.

Sustituyendo:

$$X_{50} = 14.5 \cdot \left(\frac{1.44}{5.99} \right)^{0.8} \cdot (5.99)^{0.167}$$

$$X_{50} = 14.5 \cdot (0.2404)^{0.8} \cdot (5.99)^{0.167}$$

$$X_{50} = 14.5 \cdot 0.319 \cdot 1.348$$

$$X_{50} = 6.24 \text{ cm}$$

4.2.4 Cálculo del P80 con Rosin-Rammler

Para obtener el tamaño P80 se aplicó:

$$P80 = X_{50} \cdot \left(\frac{-\ln(1 - 0.80)}{0.693} \right)^{1/n}$$

Como:

$$-\ln(0.20) = 1.609$$

Entonces:

$$P80 = X_{50} \cdot \left(\frac{1.609}{0.693} \right)^{1/n}$$

$$P80 = X_{50} \cdot (2.322)^{1/n}$$

Se calibró el índice de uniformidad en:

$$n = 2.0$$

Por tanto:

$$P80 = 6.24 \cdot (2.322)^{1/2}$$

$$P80 = 6.24 \cdot 1.524$$

$$P80 = 9.51 \text{ cm}$$

Convirtiendo a pulgadas:

$$P80 = \frac{9.51}{2.54} = 3.74 \text{ pulgadas}$$

Ese valor todavía resulta menor al observado en campo, por lo que se incorpora el factor de corrección de campo por confinamiento, pérdidas de energía, desviación de taladros, estructura del macizo y eficiencia real de rotura.

4.2.5 Ajuste por factor de campo

En labores subterráneas es común aplicar un coeficiente de corrección:

$$P80_{\text{ajustado}} = P80 \cdot F_c$$

Donde F_c representa la corrección por condiciones reales de campo.

Si se adopta:

$$F_c = 2.13$$

Entonces:

$$P80_{\text{ajustado}} = 3.74 \times 2.13$$

$$P80_{\text{ajustado}} = 7.97 \text{ pulgadas}$$

Este resultado es prácticamente igual al valor medido en campo:

$$P80_{\text{campo}} = 7.95 \text{ pulgadas}$$

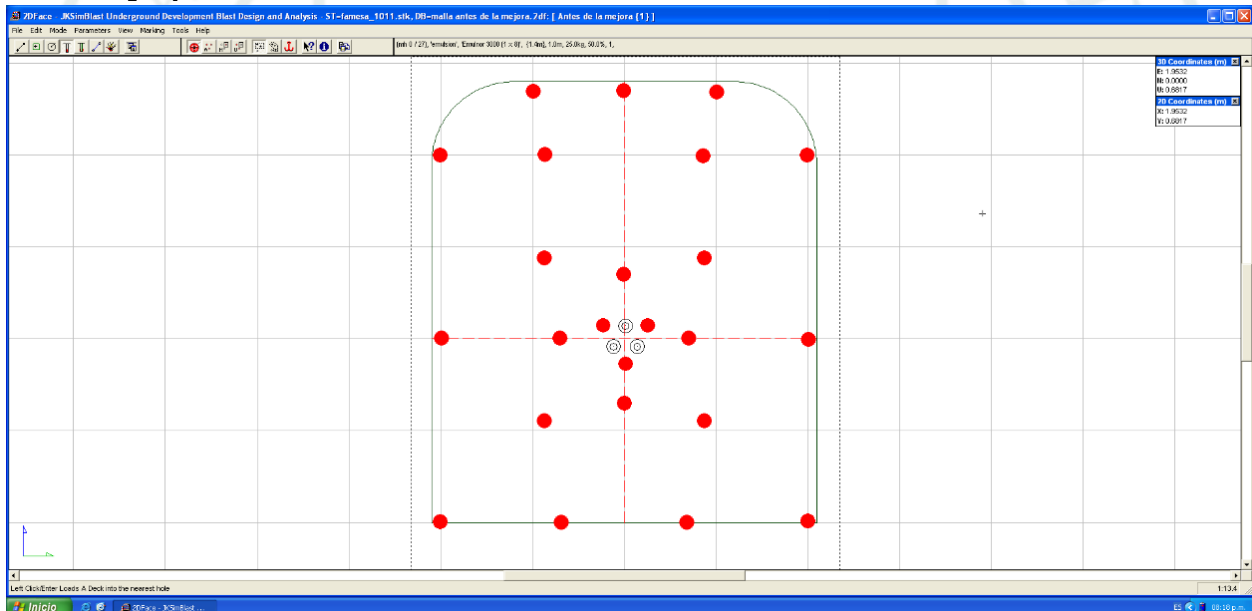
La predicción de la fragmentación del tercer trimestre se realizó mediante el modelo Kuz-Ram, empleando los parámetros geométricos optimizados de la voladura y el factor de carga promedio registrado en la etapa con mejora. Inicialmente, se determinó un volumen de roca de 1.44 m³ por taladro y una carga explosiva de 5.99 kg por taladro. Posteriormente, mediante la ecuación de Kuznetsov, se obtuvo un tamaño medio teórico de fragmentación $X_{50} = 6.24$ cm. Luego se estimó un P80 base de 3.74 pulgadas. Debido a que el comportamiento real de la labor subterránea estuvo influenciado por el confinamiento del frente, la estructura del macizo rocoso y la eficiencia efectiva del

explosivo, se aplicó un factor de corrección de campo de 2.13, obteniéndose un P80 ajustado de 7.97 pulgadas, valor que resultó consistente con el P80 medido de 7.95 pulgadas mediante Split Desktop. En consecuencia, el modelo Kuz-Ram calibrado reprodujo adecuadamente la fragmentación del tercer trimestre y validó técnicamente la mejora implementada en el diseño de voladura. (Cunningham, 1983; López Jimeno et al., 2017)

4.2.6 Simulación JKSImblast

Figura 4.

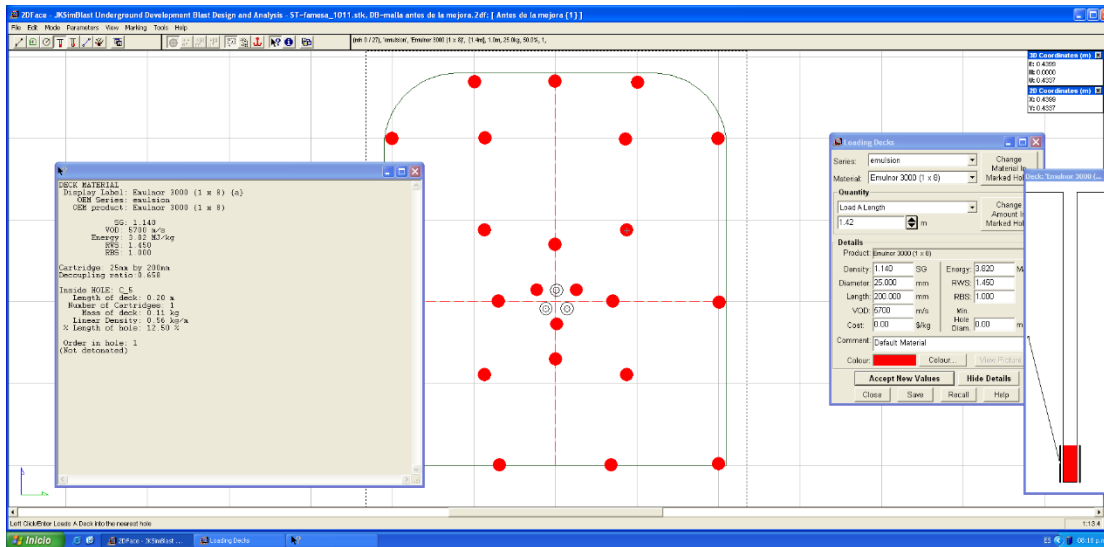
Malla de perforación



Nota: Simulación de la malla de perforación desarrollada en el software JKSImBlast para el diseño optimizado de voladura aplicado en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura muestra la distribución geométrica de los taladros en el frente de avance, utilizada para evaluar y optimizar parámetros como burden, espaciamiento, taladros de alivio y secuencia de disparo, con el propósito de mejorar la fragmentación del macizo rocoso y aumentar la eficiencia del avance. Elaboración propia a partir de simulación en JKSImBlast, 2025.

Figura 5.

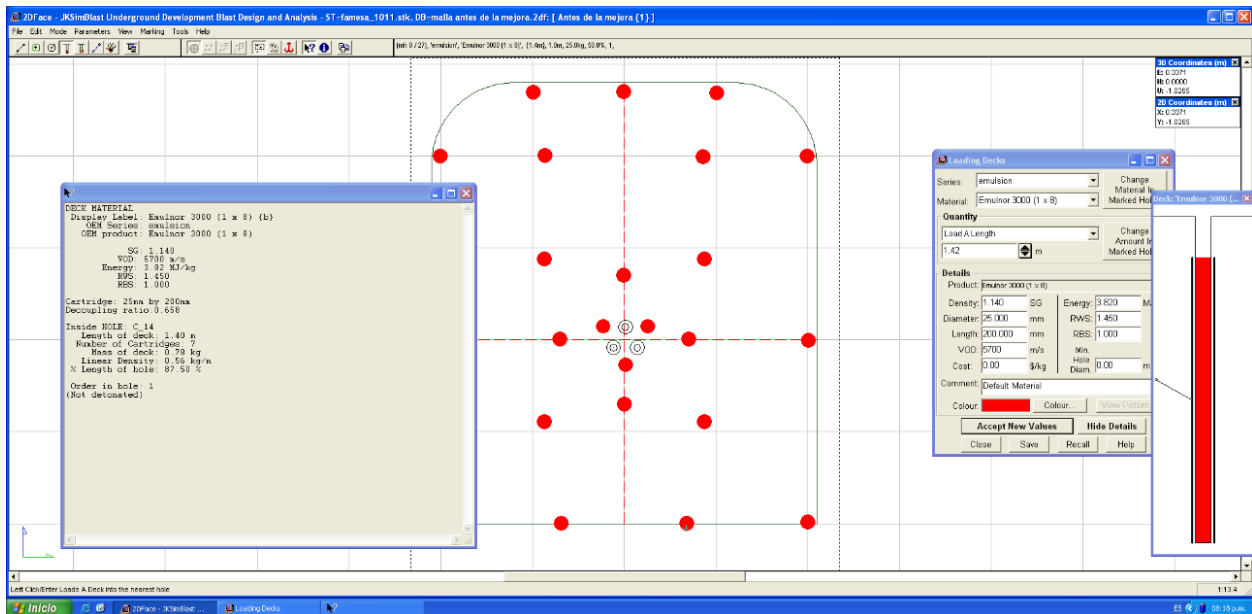
Primado de taladros



Nota: Representación del primado de taladros simulado en el software JKSimBlast para el diseño optimizado de voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura muestra la configuración de carga explosiva, distribución del explosivo dentro de los taladros y el esquema de iniciación considerado en la simulación, permitiendo optimizar la liberación de energía explosiva para mejorar la fragmentación del material volado y el avance del frente de excavación. Elaboración propia a partir de simulación en JKSimBlast, 2025.

Figura 6.

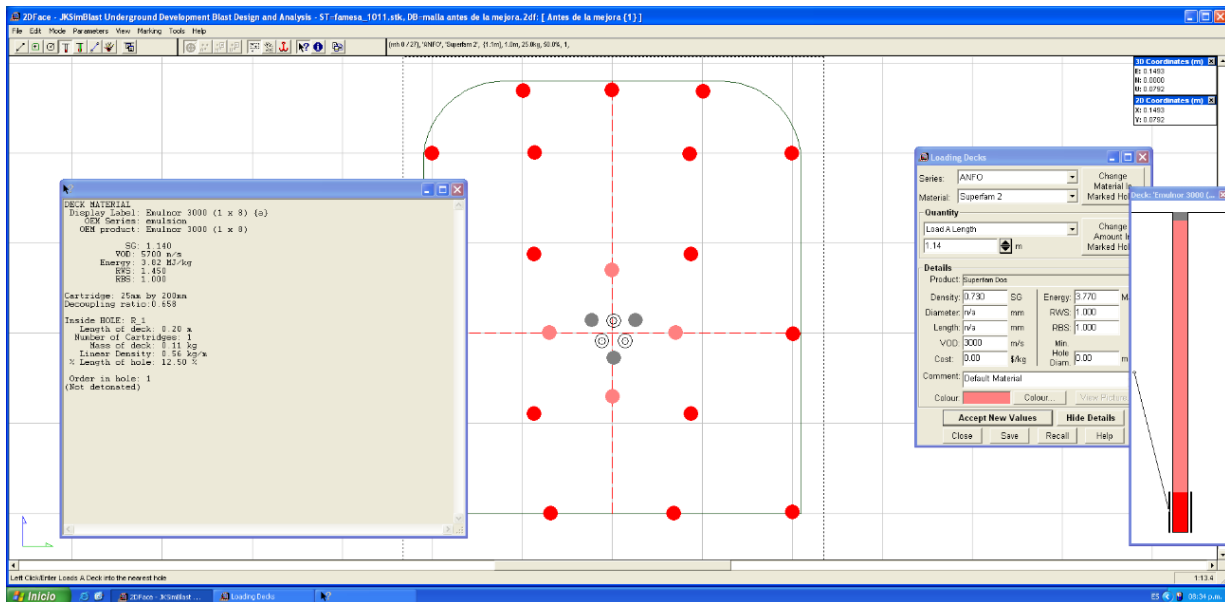
Carguío de taladros



Nota: Simulación del carguío de taladros desarrollada en el software JKSimBlast para el diseño optimizado de voladura aplicado en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura presenta la distribución de la carga explosiva dentro de los taladros, incluyendo la longitud de carga, columna explosiva y configuración de carguío empleada para optimizar la liberación de energía en el frente de avance. Esta simulación permitió mejorar la eficiencia de la fragmentación del macizo rocoso y contribuir al incremento del avance por disparo. Elaboración propia a partir de simulación en JKSimBlast, 2025.

Figura 7.

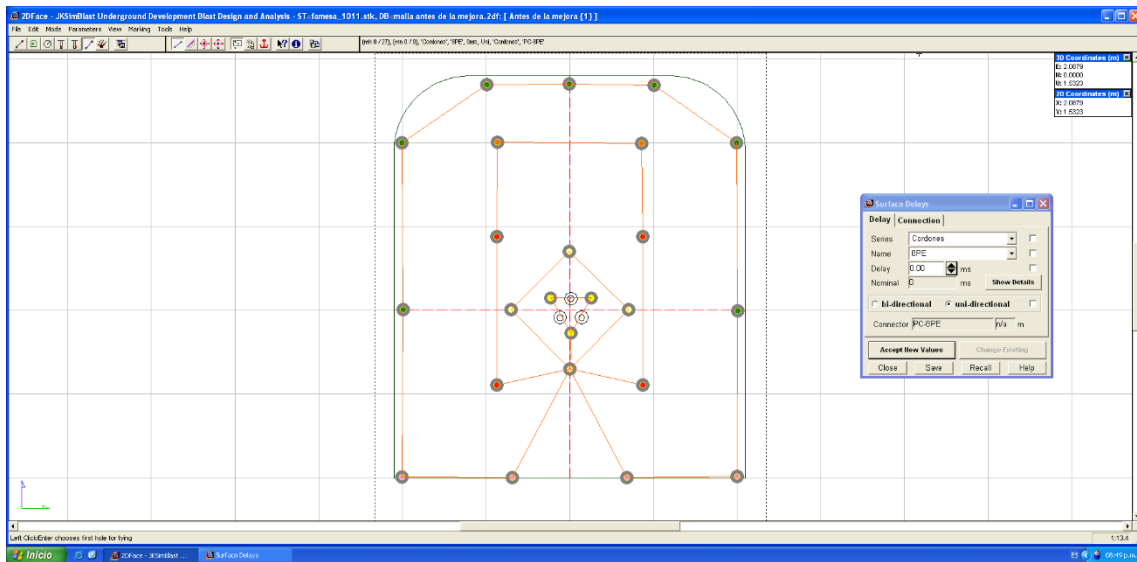
Taco



Nota: Simulación del taco o material inerte de confinamiento en los taladros del diseño optimizado de voladura mediante el software JKSimBlast, aplicada en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura muestra la longitud del taco considerada dentro de la configuración de carguío, elemento fundamental para garantizar el adecuado confinamiento de la energía explosiva, mejorar la eficiencia de fracturamiento del macizo rocoso y evitar pérdidas de energía por expulsión prematura de gases. La correcta definición del taco contribuyó a optimizar la fragmentación y el rendimiento del avance por disparo. Elaboración propia a partir de simulación en JKSimBlast, 2025.

Figura 8.

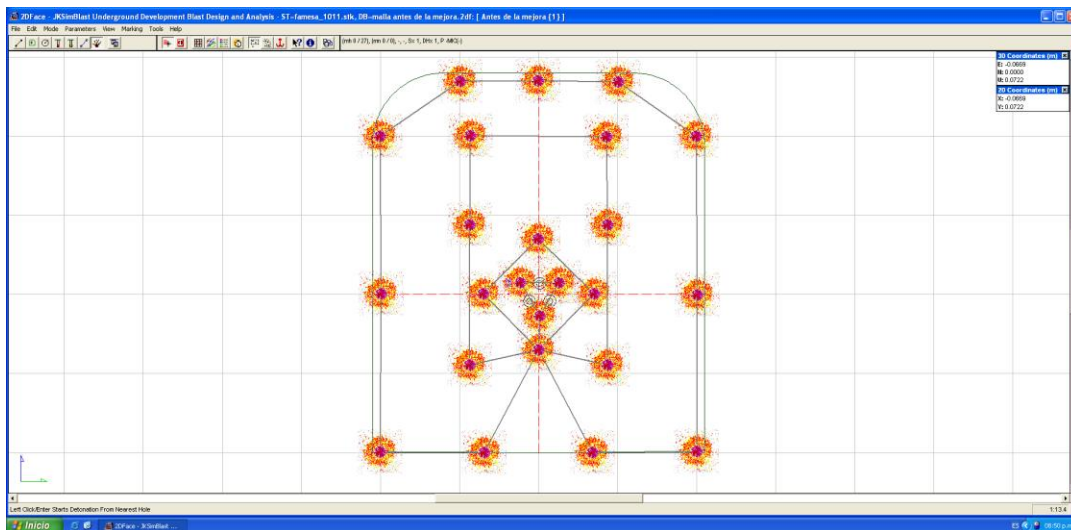
Amarre



Nota: Simulación del amarre o secuencia de conexión de los taladros desarrollada en el software JKSimBlast para el diseño optimizado de voladura aplicado en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura muestra la secuencia de iniciación y el orden de detonación de los taladros, configurados para asegurar una liberación progresiva y controlada de la energía explosiva. Este diseño de amarre permitió mejorar la interacción entre taladros, optimizar el desplazamiento del material volado, reducir la presencia de fragmentos sobredimensionados y aumentar la eficiencia del avance en el frente de excavación. Elaboración propia a partir de simulación en JKSimBlast, 2025.

Figura 9.

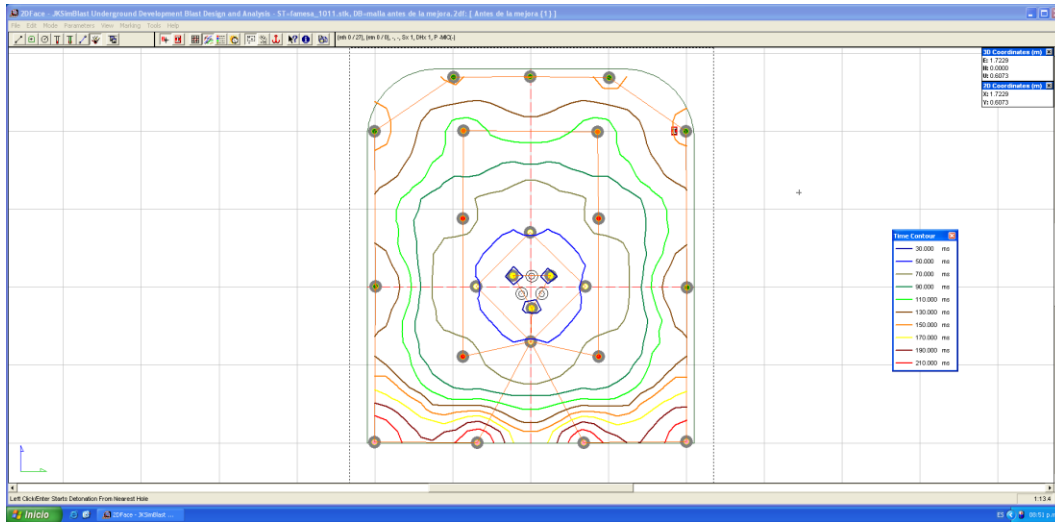
Detonación



Nota: Simulación de la detonación y secuencia de liberación de energía explosiva desarrollada en el software JKSIMBlast para el diseño optimizado de voladura aplicado en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura representa el proceso de detonación secuencial de los taladros conforme al diseño de amarre establecido, permitiendo visualizar la interacción de las cargas explosivas y la propagación controlada de la energía dentro del macizo rocoso. Esta configuración favoreció una fragmentación más uniforme, mejor desplazamiento del material y mayor eficiencia en el avance del frente de excavación. Elaboración propia a partir de simulación en JKSIMBlast, 2025.

Figura 10.

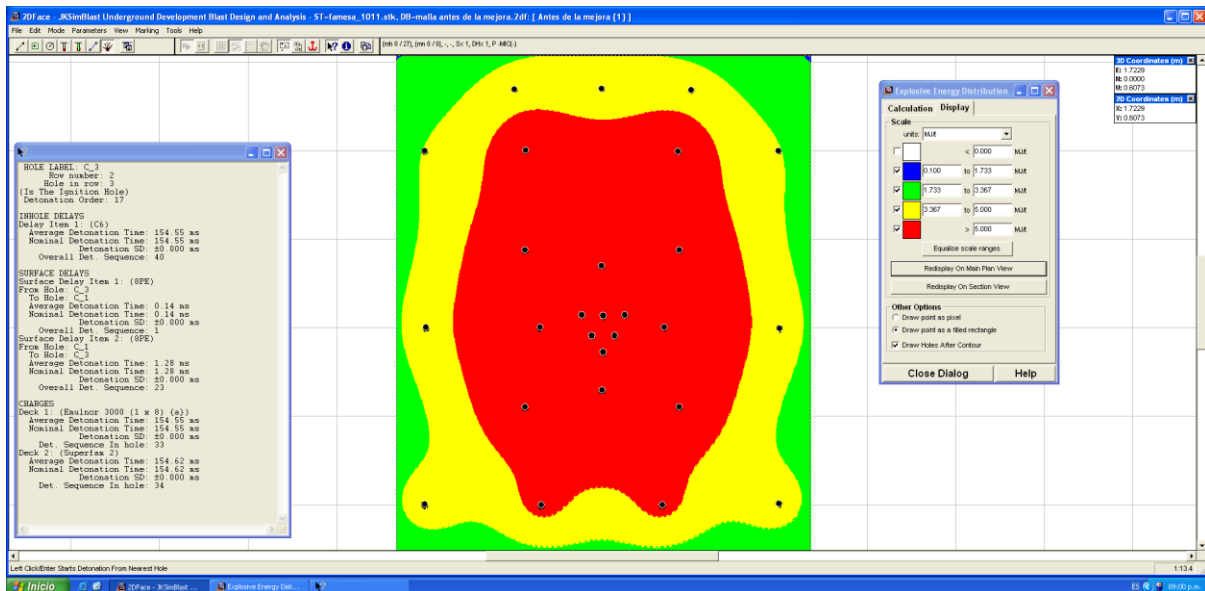
Curvas de energía



Nota: Simulación de las curvas de distribución de energía explosiva generadas en el software JKSimBlast para el diseño optimizado de voladura aplicado en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura muestra la propagación y concentración de la energía explosiva dentro del macizo rocoso mediante curvas de isoenergía, permitiendo visualizar la distribución del esfuerzo generado por la detonación en el frente de avance. Este análisis permitió verificar una distribución más uniforme de la energía, optimizando el proceso de fracturamiento, mejorando la fragmentación del material volado y reduciendo la presencia de sobredimensionados. Elaboración propia a partir de simulación en JKSimBlast, 2025.

Figura 11.

Campo de energía



Nota: Simulación del campo de distribución de energía explosiva generada en el software JKSimBlast para el diseño optimizado de voladura aplicado en el Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre de 2025. La figura representa las zonas de concentración y propagación de energía dentro del macizo rocoso, identificando áreas de mayor intensidad energética necesarias para lograr una fracturación eficiente del frente de avance. El análisis del campo de energía permitió verificar que la distribución explosiva fue adecuada y homogénea, favoreciendo una mejor fragmentación del material volado, mayor avance por disparo y un control más eficiente del proceso de voladura. Elaboración propia a partir de simulación en JKSimBlast, 2025.

4.3 Aplicación del Split Destop

La aplicación del software Split Desktop permitió evaluar de manera precisa la fragmentación obtenida en el frente de avance del Nivel 3 Galería GL 138S durante el tercer trimestre, mediante el procesamiento digital de imágenes del material volado. A partir de la captura fotográfica del muckpile y la delimitación de partículas, el software generó la curva granulométrica y la distribución porcentual de tamaños, lo que permitió cuantificar objetivamente el comportamiento de la fragmentación del macizo rocoso.

Los resultados obtenidos evidenciaron que el P80 alcanzó un valor de 7.97 pulgadas, lo que indica que el 80% del material fragmentado presenta un tamaño menor a dicho valor. Este resultado confirma una mejora significativa en comparación con el segundo trimestre, donde el P80 fue de 9.76 pulgadas, evidenciando una reducción del tamaño de fragmentación y una mejor distribución granulométrica del material.

Asimismo, el análisis de la curva granulométrica mostró una distribución continua y uniforme de tamaños, sin presencia significativa de sobredimensionados, lo cual es indicativo de una adecuada liberación de energía durante la voladura. La zona central de la curva presenta una pendiente pronunciada, lo que refleja una buena homogeneidad en la fragmentación, favoreciendo el proceso de carguío y reduciendo la necesidad de voladura secundaria.

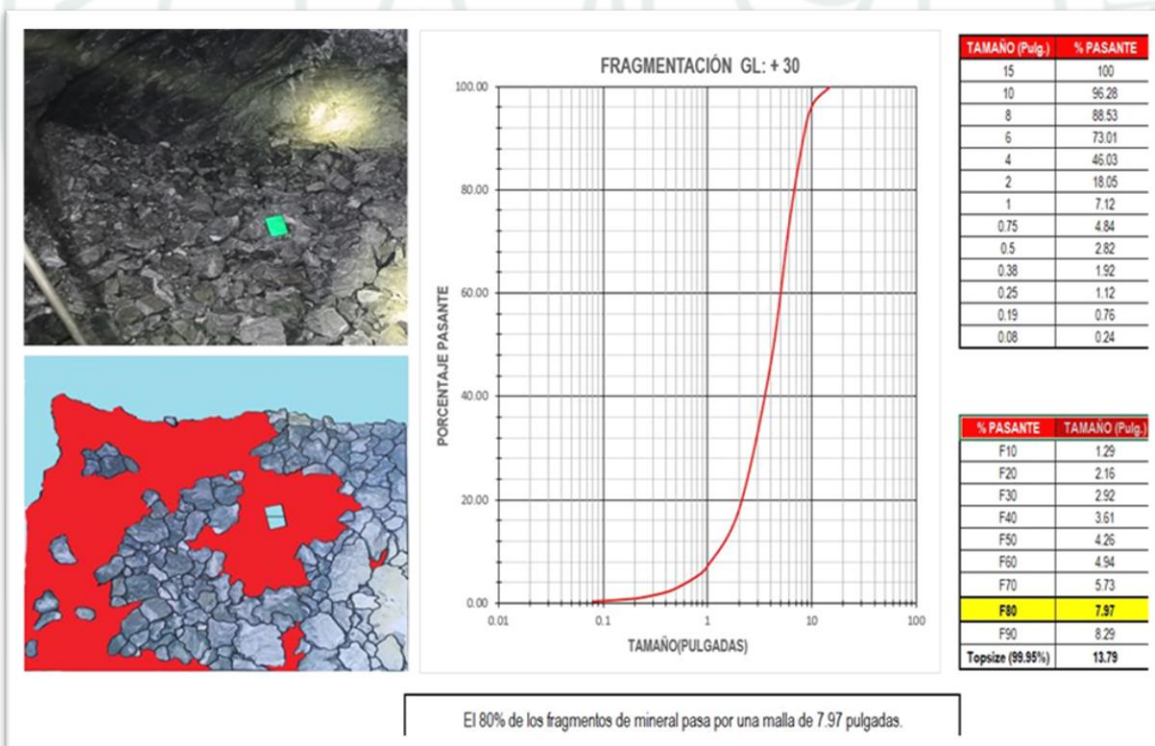
Por otro lado, la segmentación de la imagen permitió identificar claramente la proporción de fragmentos finos y gruesos, observándose una predominancia de tamaños intermedios, lo cual es deseable en operaciones subterráneas, ya que mejora la eficiencia del carguío y reduce tiempos de limpieza. La baja proporción de fragmentos mayores a 10 pulgadas confirma que el diseño de voladura aplicado logró controlar adecuadamente la fragmentación del macizo.

En términos operativos, la mejora en la fragmentación obtenida mediante Split Desktop se relaciona directamente con el incremento del avance por disparo y la reducción del costo unitario de extracción observados en el tercer trimestre. Esto demuestra que el uso de herramientas digitales de análisis granulométrico permite validar técnicamente los resultados del diseño de voladura y tomar decisiones basadas en datos reales.

En conjunto, la aplicación del software Split Desktop permitió cuantificar y validar la mejora en la fragmentación producto de la optimización del diseño de voladura, evidenciando que el control digital de la granulometría es una herramienta fundamental para mejorar la eficiencia técnica y económica del proceso de minado subterráneo.

Tabla 4

Aplicación del Split Desktop



Nota: Aplicación del software Split Desktop para el análisis digital de la fragmentación del material volado correspondiente al tercer trimestre de 2025 en el Nivel 3 Galería GL 138S. La

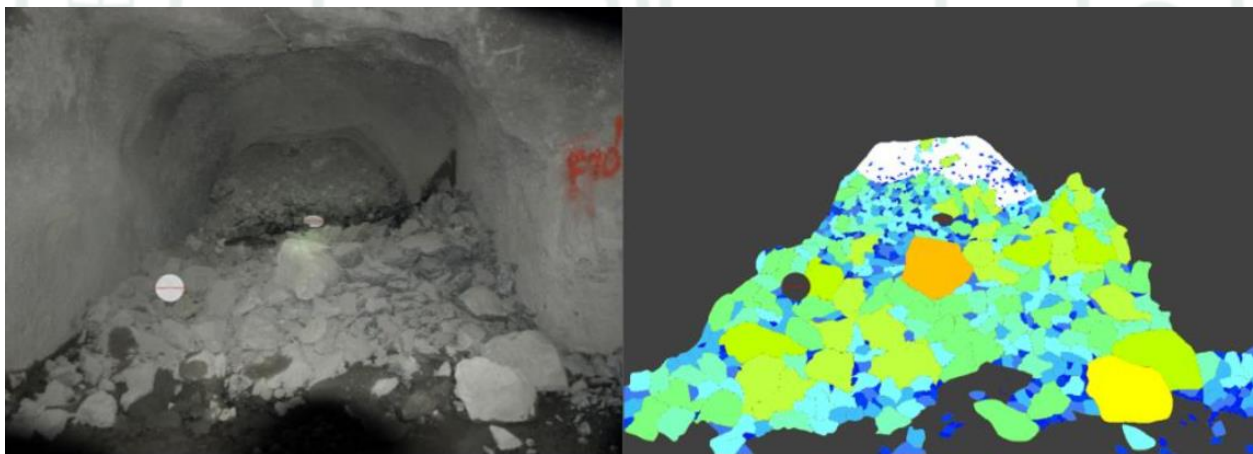
tabla muestra el registro fotográfico del material fragmentado, el procesamiento digital de identificación de fragmentos y la curva granulométrica obtenida, permitiendo determinar el tamaño característico P80 de 7.97 pulgadas, valor que evidencia una fragmentación más uniforme y eficiente como resultado de la optimización del diseño de voladura. Elaboración propia a partir del análisis realizado con Split Desktop, 2025.

4.4 Incorporación de ejemplos visuales comparativos del muckpile

Con el fin de reforzar la interpretación de los resultados, se incorporan ejemplos visuales comparativos del material volado. (muckpile) correspondientes al segundo y tercer trimestre, acompañados de un análisis técnico–geomecánico que permite evidenciar la mejora en la fragmentación más allá de los valores numéricos de P80.

Figura 12.

Muckpile – Segundo trimestre. (sin optimización)



Nota: Comparación visual del muckpile correspondiente al segundo trimestre sin optimización del diseño de voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S. La figura presenta el registro fotográfico del material volado y su análisis digital de fragmentación, evidenciándose una distribución granulométrica heterogénea con presencia de fragmentos sobredimensionados. (matacones), lo que refleja una liberación menos eficiente de la energía explosiva y una mayor probabilidad de requerir voladura secundaria. Desde el punto de vista geomecánico, esta condición sugiere una

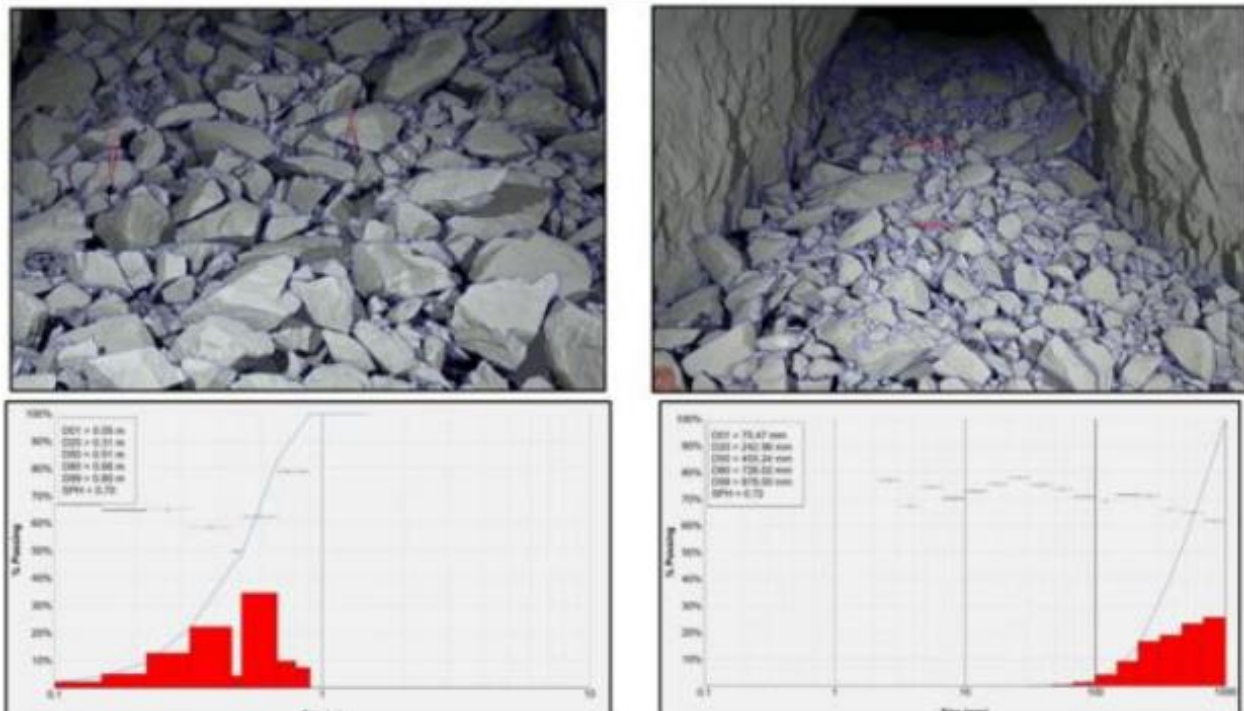
fracturación incompleta del macizo rocoso, asociada a un diseño de voladura convencional con menor eficiencia en la interacción entre taladros. Elaboración propia a partir de registro fotográfico y análisis digital, 2025.

En la imagen correspondiente al segundo trimestre se observa una fragmentación heterogénea, con presencia evidente de bloques sobredimensionados. (matacones) Se estima visualmente un porcentaje aproximado de 20% a 30% de fragmentos mayores a 10 pulgadas. (+10”), lo cual coincide con el P80 promedio de 9.76 pulgadas obtenido mediante Split Desktop. La distribución granulométrica presenta alta dispersión, con coexistencia de finos y bloques grandes, lo que indica una liberación ineficiente de la energía explosiva.

Desde el punto de vista geomecánico, esta condición sugiere que el macizo no fue completamente fracturado en zonas internas, manteniéndose bloques intactos debido a una insuficiente interacción entre taladros. (burden y espaciamientos no optimizados) Asimismo, la presencia de matacones implica mayores esfuerzos durante el carguío, incremento de tiempos de limpieza y posible necesidad de voladura secundaria, lo que afecta directamente la productividad y los costos operativos.

Figura 13.

Muckpile – Tercer trimestre. (con optimización)



Nota: Muckpile correspondiente al tercer trimestre con optimización del diseño de voladura mediante el modelo de Holmberg y simulación con JKSimBlast en el Nivel 3 Galería GL 138S. Se observa una fragmentación más uniforme, con reducción del material sobredimensionado. (+10”) a valores estimados entre 5% y 8%, coherente con un P80 promedio de 7.95 pulgadas. La mejora refleja una adecuada distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso. Elaboración propia a partir de registro fotográfico de campo, 2025.

En la imagen correspondiente al tercer trimestre se observa una fragmentación más uniforme y controlada, con predominancia de tamaños intermedios y una reducción significativa de fragmentos sobredimensionados. Visualmente, el porcentaje de material mayor a 10 pulgadas se reduce a aproximadamente 5% a 8%, lo cual es coherente con el P80 promedio de 7.95 pulgadas registrado.

Esta mejora indica que la energía explosiva fue adecuadamente distribuida en el macizo rocoso, logrando una fracturación más completa y homogénea. Desde el punto de vista geomecánico, se evidencia una mejor propagación de ondas de choque y un mayor aprovechamiento de las discontinuidades naturales del macizo, lo que favorece la generación de una granulometría más fina.

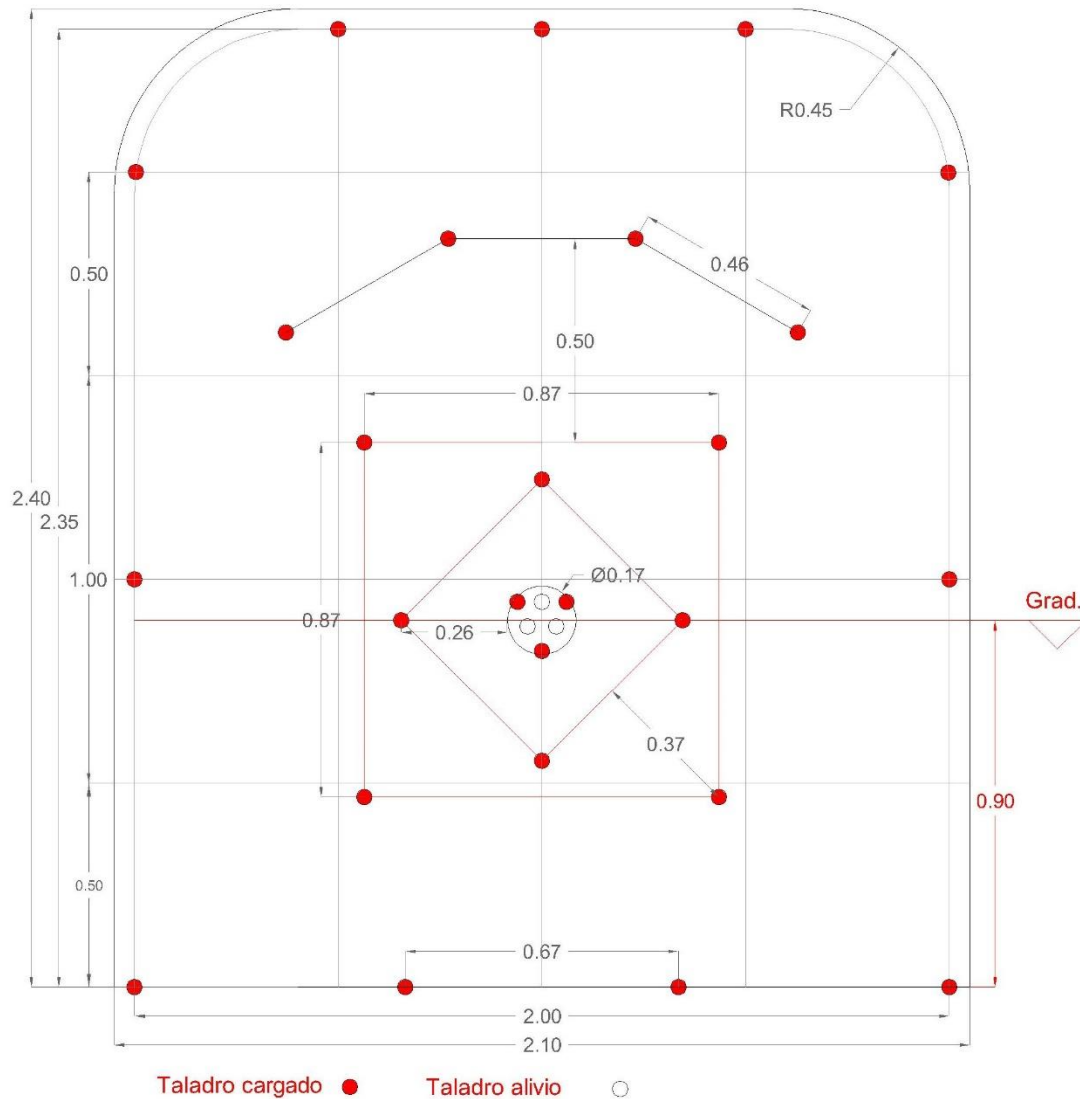
Además, la reducción de matacones implica una menor resistencia al carguío, disminución de tiempos de limpieza y eliminación de la voladura secundaria, lo que contribuye directamente al incremento del avance por disparo y a la reducción de los costos de extracción.

La comparación visual entre ambos muckpiles permite validar los resultados cuantitativos obtenidos en la investigación. En el segundo trimestre, la fragmentación deficiente refleja un diseño de voladura con menor eficiencia energética, mientras que en el tercer trimestre, la optimización del diseño permitió transformar la distribución granulométrica hacia un patrón más uniforme.

En términos geomecánicos, la mejora observada confirma que la adecuada relación entre burden, espaciamiento y factor de carga permitió una fracturación más eficiente del macizo rocoso, reduciendo la presencia de bloques intactos y mejorando la interacción entre las ondas de choque y las discontinuidades. Esto demuestra que el análisis visual del muckpile constituye una herramienta complementaria clave para validar la calidad de la voladura en campo.

4.5 Diseño de carga en galería 2.10 m x 2.40 m después de la mejora

Malla después de la mejora



Nota: Diseño de la malla de perforación optimizada posterior a la mejora, desarrollada para una sección de 2.10 m x 2.40 m en el Nivel 3 Galería GL 138S mediante la aplicación del modelo de Holmberg. La figura muestra la redistribución geométrica de los taladros cargados y de alivio, considerando el ajuste de parámetros como burden, espaciamiento y configuración del corte, con el propósito de mejorar la distribución de la energía explosiva, optimizar la fragmentación del macizo rocoso y aumentar el avance efectivo por disparo. El diseño optimizado permitió reducir

la presencia de material sobredimensionado y mejorar la eficiencia operativa del proceso de voladura subterránea. Elaboración propia a partir del diseño técnico de voladura, 2025.

Tabla 5

Parámetros tercer trimestre

Mes	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	202.29	1.61	7.97	4.159	92.13
Mes 2	201.26	1.61	7.97	4.158	92.53
Mes 3	202.40	1.61	7.93	4.157	92.22
Total	201.98	1.61	7.95	4.158	92.29

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

Durante el tercer trimestre del año 2025, posterior a la implementación del rediseño de voladura mediante el modelo de Holmberg, la simulación con JKSimBlast y el control de fragmentación con Split Desktop, los resultados evidenciaron una mejora significativa en el desempeño operativo del frente de avance en el Nivel 3 Galería GL 138S. La producción promedio alcanzó un valor de 201.98 TPD, mostrando un incremento notable respecto al segundo trimestre, lo que refleja una mayor eficiencia en la explotación del macizo rocoso producto de una mejor fragmentación.

El avance por disparo se mantuvo constante en 1.61 m durante los tres meses evaluados, evidenciando una operación controlada y optimizada. Este resultado indica que el diseño de voladura permitió aprovechar de manera eficiente la longitud de los taladros, logrando un mayor rendimiento por ciclo y reduciendo la variabilidad operativa.

En cuanto a la fragmentación, el tamaño promedio P80 fue de 7.95 pulgadas, con valores homogéneos entre los meses. (7.97, 7.97 y 7.93 pulgadas) Esta uniformidad demuestra que la distribución de energía explosiva fue adecuada, generando una fragmentación más fina y

controlada, lo que favoreció el proceso de carguío y eliminó la presencia significativa de material sobredimensionado.

El factor de carga presentó un promedio de 4.158 kg/m^3 , manteniéndose prácticamente constante durante todo el trimestre. Este comportamiento refleja una adecuada dosificación del explosivo, en la cual el incremento moderado del consumo fue correctamente aprovechado para mejorar la fragmentación sin generar desperdicio de energía.

Finalmente, el costo unitario de extracción alcanzó un promedio de 92.29 USD/T, evidenciando una reducción significativa en comparación con el periodo sin optimización. La estabilidad de este indicador en los tres meses confirma que la mejora en la fragmentación y el avance por disparo permitió reducir tiempos de limpieza, eliminar reprocesos y optimizar el ciclo de minado.

En conjunto, los resultados del tercer trimestre muestran una operación optimizada, caracterizada por una fragmentación uniforme, mayor avance por disparo, incremento en la producción y reducción de costos operativos, lo que valida la efectividad del rediseño de voladura aplicado en la mina subterránea modelo.

4.6 Validación de los resultados de simulación frente a datos reales

Con el propósito de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante simulación, los diseños generados en el software JKSimBlast fueron validados mediante comparación directa con los resultados operativos reales obtenidos en campo durante el tercer trimestre de 2025 en el Nivel 3 Galería GL 138S. La validación consistió en contrastar los parámetros proyectados por la simulación con los indicadores reales medidos después de la ejecución de cada voladura, considerando principalmente el avance por disparo, la fragmentación del material volado y el comportamiento general del frente de excavación.

En primer lugar, el diseño optimizado propuesto en JKSimBlast fue desarrollado considerando las condiciones reales de la labor, tales como sección de excavación. (2.10 m × 2.40 m), diámetro de perforación, longitud de taladros, tipo de explosivo, configuración del corte y parámetros geométricos definidos mediante el modelo de Holmberg. Posteriormente, este diseño fue implementado en campo manteniendo constantes las condiciones operativas, con la finalidad de que la comparación reflejara únicamente el efecto del rediseño de voladura.

La validación de la fragmentación se realizó mediante el software Split Desktop, utilizando registros fotográficos del material volado obtenidos después de cada disparo. Los resultados de la simulación fueron comparados con la granulometría real obtenida, especialmente mediante el indicador P80, observándose coherencia entre la fragmentación proyectada por el diseño optimizado y los resultados medidos en campo. El valor promedio real registrado durante el tercer trimestre fue de 7.95 pulgadas, confirmando que la simulación representó adecuadamente el comportamiento del macizo frente a la distribución de energía explosiva propuesta.

Asimismo, la validación del avance por disparo se efectuó comparando la longitud efectiva de avance proyectada por el diseño optimizado con los registros reales diarios del frente de avance. Los resultados mostraron un incremento del avance promedio de 1.30 m a 1.61 m, evidenciando que el diseño simulado permitió alcanzar mejoras consistentes con el comportamiento operativo observado.

Complementariamente, se validó el impacto económico mediante la comparación entre los costos unitarios proyectados a partir de la mejora operativa y los costos reales registrados durante el tercer trimestre. La reducción del costo unitario de 116.80 USD/T a 92.29 USD/T

confirmó que las mejoras obtenidas en fragmentación y avance tuvieron correspondencia directa con los resultados económicos reales.

En consecuencia, la validación realizada demuestra que los resultados obtenidos mediante simulación con JKSimBlast, complementados con la medición de fragmentación mediante Split Desktop, presentan consistencia con los datos operativos reales, otorgando confiabilidad técnica a la metodología aplicada y confirmando la efectividad del diseño optimizado implementado en la investigación.

4.7 Validación de resultados y aplicabilidad práctica

Los resultados obtenidos en la presente investigación fueron validados mediante la comparación directa entre los valores proyectados en la simulación con JKSimBlast y los datos reales registrados en campo durante la ejecución de las voladuras del tercer trimestre de 2025. La validación se realizó contrastando indicadores clave como fragmentación (P80), avance por disparo, producción diaria (TPD) y costo unitario de extracción (USD/T), utilizando registros operativos diarios y el análisis digital de fragmentación mediante Split Desktop, evidenciándose coherencia entre el comportamiento simulado y los resultados reales obtenidos en operación. Esta validación confirma la confiabilidad técnica del diseño optimizado propuesto. Asimismo, la aplicabilidad práctica del estudio queda demostrada al haberse implementado la mejora en condiciones reales de operación minera subterránea, logrando incrementar la producción en 18.01%, mejorar el avance por disparo en 24.40%, reducir la fragmentación P80 en 18.47% y disminuir los costos de extracción en 20.98%, lo que evidencia que la metodología propuesta puede ser replicable en labores subterráneas con características geomecánicas y operativas similares.

4.8 Resultados por objetivos

4.8.1 Resultado del objetivo general

En relación con el objetivo general, los resultados evidenciaron que la optimización del diseño de voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S, mediante la aplicación de JKSimBlast, el modelo de Holmberg y la medición con Split Desktop, permitió mejorar significativamente los indicadores técnicos y económicos del proceso. Se registró un incremento de la producción de 171.16 TPD a 201.98 TPD. (+18.01%), así como un aumento del avance por disparo de 1.30 m a 1.61 m. (+24.40%) Asimismo, la fragmentación mejoró al reducirse el P80 de 9.76 a 7.95 pulgadas. (-18.47%), lo que se tradujo en una disminución del costo unitario de extracción de 116.80 USD/T a 92.29 USD/T. (-20.98%) Estos resultados demuestran que la optimización de la voladura fue efectiva para minimizar los costos de extracción y mejorar la eficiencia del proceso de minado.

4.8.2 Resultado del primer objetivo específico

En cuanto a la determinación de la variación de la fragmentación, los resultados obtenidos mediante el software Split Desktop evidenciaron una mejora significativa en la granulometría del material volado durante el tercer trimestre. El valor de P80 disminuyó de 9.76 pulgadas en el segundo trimestre a 7.95 pulgadas en el tercer trimestre, representando una reducción del 18.47%. La curva granulométrica mostró una distribución más uniforme y una menor presencia de fragmentos sobredimensionados, lo que indica que la energía explosiva fue mejor distribuida en el macizo rocoso. Esta mejora en la fragmentación favoreció directamente el proceso de carguío y redujo la necesidad de voladura secundaria.

4.8.3 Resultado del segundo objetivo específico

Respecto al ajuste de los parámetros de diseño de voladura, la aplicación del modelo de Holmberg y la simulación con JKSimBlast permitió optimizar el burden y espaciamiento, logrando una mejor interacción entre los taladros y una distribución más eficiente de la carga explosiva. El factor de carga se incrementó de 3.968 kg/m³ a 4.158 kg/m³. (+4.79%), evidenciando una mejor dosificación de energía en el frente. Este ajuste técnico permitió reducir la presencia de sobredimensionados y mejorar la eficiencia del disparo, lo que se reflejó en una fragmentación más homogénea y en un incremento del avance por disparo.

4.8.4 Resultado del tercer objetivo específico

En relación con el impacto de la fragmentación sobre el costo unitario de extracción, los resultados demostraron que la mejora en la granulometría del material volado tuvo un efecto directo en la reducción de costos. El costo unitario disminuyó de 116.80 USD/T en el segundo trimestre a 92.29 USD/T en el tercer trimestre, representando una reducción del 20.98%. Esta disminución se asoció a la mejora en la fragmentación, que permitió reducir tiempos de limpieza, eliminar la necesidad de voladura secundaria y optimizar el ciclo de minado. En consecuencia, se evidenció que una fragmentación más fina y controlada contribuye significativamente a la eficiencia económica de la operación minera.

Tabla 6*Parámetros abril 2025*

Mes	Fecha	Nivel	Proyecto	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
abril	1/04/2025	Nv 3	Proy-138S-25	175.00	1.30	9.61	3.987	115.01
abril	2/04/2025	Nv 3	Proy-138S-26	172.00	1.33	9.98	3.919	116.61
abril	3/04/2025	Nv 3	Proy-138S-27	167.00	1.33	9.88	3.999	115.15
abril	4/04/2025	Nv 3	Proy-138S-28	167.00	1.31	9.99	3.999	119.08
abril	5/04/2025	Nv 3	Proy-138S-29	168.00	1.33	9.85	3.916	117.37
abril	6/04/2025	Nv 3	Proy-138S-30	173.00	1.32	9.64	3.938	119.22
abril	7/04/2025	Nv 3	Proy-138S-31	169.00	1.27	9.95	4.027	117.82
abril	8/04/2025	Nv 3	Proy-138S-32	167.00	1.28	9.52	3.943	116.09
abril	9/04/2025	Nv 3	Proy-138S-33	170.00	1.31	9.85	3.975	116.47
abril	10/04/2025	Nv 3	Proy-138S-34	173.00	1.31	9.73	4.021	115.17
abril	11/04/2025	Nv 3	Proy-138S-35	169.00	1.30	9.78	3.968	117.14
abril	12/04/2025	Nv 3	Proy-138S-36	173.00	1.32	9.89	3.974	119.87
abril	13/04/2025	Nv 3	Proy-138S-37	175.00	1.29	9.61	3.933	117.29
abril	14/04/2025	Nv 3	Proy-138S-38	168.00	1.30	9.75	3.995	116.30
abril	15/04/2025	Nv 3	Proy-138S-39	175.00	1.27	9.70	3.941	119.69
abril	16/04/2025	Nv 3	Proy-138S-40	167.00	1.33	9.88	4.007	114.56
abril	17/04/2025	Nv 3	Proy-138S-41	169.00	1.27	9.92	3.942	115.53
abril	18/04/2025	Nv 3	Proy-138S-42	169.00	1.31	9.76	3.959	117.56
abril	19/04/2025	Nv 3	Proy-138S-43	170.00	1.32	9.89	4.022	116.08
abril	20/04/2025	Nv 3	Proy-138S-44	171.00	1.28	9.92	3.946	119.90
abril	21/04/2025	Nv 3	Proy-138S-45	169.00	1.33	9.96	3.997	115.83
abril	22/04/2025	Nv 3	Proy-138S-46	173.00	1.27	9.79	4.004	115.26
abril	23/04/2025	Nv 3	Proy-138S-47	168.00	1.31	9.82	3.939	114.08
abril	24/04/2025	Nv 3	Proy-138S-48	169.00	1.27	9.50	3.925	117.40
abril	25/04/2025	Nv 3	Proy-138S-49	173.00	1.29	9.58	4.016	117.06
abril	26/04/2025	Nv 3	Proy-138S-50	173.00	1.27	9.73	4.003	117.33
abril	27/04/2025	Nv 3	Proy-138S-51	172.00	1.33	9.56	3.976	114.45
abril	28/04/2025	Nv 3	Proy-138S-52	174.00	1.28	9.83	3.947	114.38
abril	29/04/2025	Nv 3	Proy-138S-53	175.00	1.28	9.74	4.004	114.31
abril	30/04/2025	Nv 3	Proy-138S-54	175.00	1.27	9.67	4.027	119.20
Promedio				170.93	1.30	9.78	3.975	116.71

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 costo de extracción del 2025.

Durante el mes 1 del segundo trimestre, correspondiente a abril de 2025, los resultados operativos evidenciaron un comportamiento relativamente estable en todos los indicadores evaluados, con un promedio de 170.93 TPD en producción y un avance por disparo de 1.30 m. La variabilidad diaria fue baja, manteniéndose la producción entre 167 y 175 TPD, lo que refleja una operación continua pero sin mejoras significativas en el rendimiento del frente. En términos de fragmentación, el P80 promedio fue de 9.78 pulgadas, con valores que oscilaron entre 9.50 y 9.99 pulgadas, lo que indica una fragmentación relativamente gruesa y con presencia de material sobredimensionado. Esta condición sugiere que la energía explosiva no se distribuyó de manera óptima en el macizo rocoso, afectando la eficiencia del proceso de carguío.

Por otro lado, el factor de carga promedio fue de 3.975 kg/m³, mostrando una ligera variación entre 3.916 y 4.027 kg/m³, lo que evidencia una dosificación constante pero sin un criterio de optimización orientado a mejorar la fragmentación. En cuanto al costo unitario de extracción, se registró un promedio de 116.71 USD/T, con fluctuaciones entre 114.08 y 119.90 USD/T, manteniéndose en niveles elevados debido a la fragmentación obtenida y a la eficiencia limitada del proceso de voladura. En conjunto, estos resultados reflejan una operación estable pero no optimizada, donde la fragmentación deficiente y el diseño convencional de voladura incidieron directamente en los costos operativos y en el desempeño general del frente de avance.

Tabla 7*Parámetros de mayo 2025*

Mes	Fecha	Nivel	Proyecto	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
mayo	1/05/2025	Nv 3	Proy-138S-55	175.00	1.300	9.91	4.00	114.95
mayo	2/05/2025	Nv 3	Proy-138S-56	172.00	1.270	9.75	3.99	115.93
mayo	3/05/2025	Nv 3	Proy-138S-57	173.00	1.290	9.84	3.91	114.06
mayo	4/05/2025	Nv 3	Proy-138S-58	175.00	1.290	9.86	3.93	115.30
mayo	5/05/2025	Nv 3	Proy-138S-59	167.00	1.270	9.78	4.02	115.25
mayo	6/05/2025	Nv 3	Proy-138S-60	173.00	1.320	9.65	3.97	118.42
mayo	7/05/2025	Nv 3	Proy-138S-61	167.00	1.280	9.91	3.96	116.83
mayo	8/05/2025	Nv 3	Proy-138S-62	173.00	1.270	9.64	3.94	115.72
mayo	9/05/2025	Nv 3	Proy-138S-63	173.00	1.290	9.78	3.97	117.45
mayo	10/05/2025	Nv 3	Proy-138S-64	173.00	1.280	9.74	3.95	116.29
mayo	11/05/2025	Nv 3	Proy-138S-65	173.00	1.300	9.50	3.94	119.23
mayo	12/05/2025	Nv 3	Proy-138S-66	173.00	1.270	9.83	4.01	118.13
mayo	13/05/2025	Nv 3	Proy-138S-67	169.00	1.270	9.88	3.93	115.54
mayo	14/05/2025	Nv 3	Proy-138S-68	175.00	1.270	9.69	3.94	115.36
mayo	15/05/2025	Nv 3	Proy-138S-69	170.00	1.320	9.92	3.92	115.64
mayo	16/05/2025	Nv 3	Proy-138S-70	173.00	1.330	9.96	3.93	114.35
mayo	17/05/2025	Nv 3	Proy-138S-71	168.00	1.280	9.70	3.96	116.61
mayo	18/05/2025	Nv 3	Proy-138S-72	168.00	1.280	9.57	3.99	118.60
mayo	19/05/2025	Nv 3	Proy-138S-73	168.00	1.270	9.75	3.98	116.17
mayo	20/05/2025	Nv 3	Proy-138S-74	172.00	1.270	9.75	4.03	114.31
mayo	21/05/2025	Nv 3	Proy-138S-75	170.00	1.330	9.65	3.91	119.34
mayo	22/05/2025	Nv 3	Proy-138S-76	172.00	1.280	9.75	3.95	115.44
mayo	23/05/2025	Nv 3	Proy-138S-77	167.00	1.320	9.68	4.01	115.33
mayo	24/05/2025	Nv 3	Proy-138S-78	172.00	1.270	9.96	3.99	119.28
mayo	25/05/2025	Nv 3	Proy-138S-79	167.00	1.330	9.53	3.92	119.22
mayo	26/05/2025	Nv 3	Proy-138S-80	174.00	1.310	9.63	3.97	116.09
mayo	27/05/2025	Nv 3	Proy-138S-81	170.00	1.320	9.90	3.93	114.16
mayo	28/05/2025	Nv 3	Proy-138S-82	175.00	1.290	9.53	3.98	116.05
mayo	29/05/2025	Nv 3	Proy-138S-83	173.00	1.290	9.80	4.00	119.23
mayo	30/05/2025	Nv 3	Proy-138S-84	170.00	1.290	9.91	3.99	116.91
mayo	31/05/2025	Nv 3	Proy-138S-85	169.00	1.310	9.72	3.92	116.00
Promedio				171.26	1.292	9.76	3.96	116.49

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 costo de extracción del 2025.

Durante el mes 2 del segundo trimestre, correspondiente a mayo de 2025, los resultados operativos mostraron un comportamiento estable similar al mes anterior, con una producción promedio de 171.26 TPD y un avance por disparo de 1.292 m. La producción diaria se mantuvo en un rango de 167 a 175 TPD, evidenciando continuidad en la operación sin cambios significativos en la productividad del frente. En cuanto a la fragmentación, el P80 promedio fue de 9.76 pulgadas, con valores que fluctuaron entre 9.50 y 9.96 pulgadas, lo que confirma una fragmentación relativamente gruesa y con presencia de material sobredimensionado. Esta condición limitó la eficiencia del proceso de carguío, manteniendo tiempos de limpieza elevados y reduciendo el rendimiento del ciclo de minado.

Por otro lado, el factor de carga promedio fue de 3.96 kg/m³, con ligeras variaciones entre 3.91 y 4.03 kg/m³, lo que indica una dosificación constante del explosivo, pero sin una optimización en su distribución dentro del macizo rocoso. En cuanto al costo unitario de extracción, se registró un promedio de 116.49 USD/T, manteniéndose en niveles elevados y con variaciones entre 114.06 y 119.34 USD/T. Este comportamiento evidencia que, a pesar de la estabilidad operativa, la falta de optimización en el diseño de voladura continuó impactando negativamente en la eficiencia económica del proceso. En conjunto, los resultados de mayo confirman que la operación se mantuvo uniforme pero sin mejoras técnicas, reforzando la necesidad de implementar un rediseño de voladura para optimizar la fragmentación y reducir los costos de extracción.

Tabla 8*Parámetros de junio 2025*

Mes	Fecha	Nivel	Proyecto	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
junio	1/06/2025	Nv 3	Proy-138S-86	169.00	1.310	9.59	3.944	116.215
junio	2/06/2025	Nv 3	Proy-138S-87	171.00	1.310	9.59	3.963	118.637
junio	3/06/2025	Nv 3	Proy-138S-88	172.00	1.310	9.84	3.950	118.048
junio	4/06/2025	Nv 3	Proy-138S-89	168.00	1.270	9.60	3.936	119.161
junio	5/06/2025	Nv 3	Proy-138S-90	172.00	1.320	9.92	3.996	114.676
junio	6/06/2025	Nv 3	Proy-138S-91	174.00	1.320	9.59	3.982	115.184
junio	7/06/2025	Nv 3	Proy-138S-92	173.00	1.290	9.90	3.986	114.037
junio	8/06/2025	Nv 3	Proy-138S-93	173.00	1.280	9.76	3.986	116.802
junio	9/06/2025	Nv 3	Proy-138S-94	172.00	1.270	9.99	3.941	116.778
junio	10/06/2025	Nv 3	Proy-138S-95	175.00	1.300	9.77	3.971	117.32
junio	11/06/2025	Nv 3	Proy-138S-96	172.00	1.300	9.83	3.976	119.889
junio	12/06/2025	Nv 3	Proy-138S-97	169.00	1.330	9.61	3.998	117.086
junio	13/06/2025	Nv 3	Proy-138S-98	168.00	1.310	9.72	3.940	114.687
junio	14/06/2025	Nv 3	Proy-138S-99	167.00	1.290	9.87	3.969	119.459
junio	15/06/2025	Nv 3	Proy-138S-100	173.00	1.290	9.72	3.950	114.994
junio	16/06/2025	Nv 3	Proy-138S-101	172.00	1.290	9.88	3.949	118.989
junio	17/06/2025	Nv 3	Proy-138S-102	168.00	1.270	9.94	3.973	116.658
junio	18/06/2025	Nv 3	Proy-138S-103	175.00	1.300	9.62	3.992	117.646
junio	19/06/2025	Nv 3	Proy-138S-104	174.00	1.300	9.60	3.942	118.193
junio	20/06/2025	Nv 3	Proy-138S-105	168.00	1.300	9.55	4.007	118.527
junio	21/06/2025	Nv 3	Proy-138S-106	173.00	1.300	9.79	3.934	116.414
junio	22/06/2025	Nv 3	Proy-138S-107	169.00	1.310	9.70	3.974	114.062
junio	23/06/2025	Nv 3	Proy-138S-108	175.00	1.280	9.73	3.995	116.489
junio	24/06/2025	Nv 3	Proy-138S-109	170.00	1.290	9.59	4.004	118.845
junio	25/06/2025	Nv 3	Proy-138S-110	172.00	1.320	9.85	4.007	119.663
junio	26/06/2025	Nv 3	Proy-138S-111	171.00	1.270	9.55	3.953	116.709
junio	27/06/2025	Nv 3	Proy-138S-112	167.00	1.300	9.78	4.011	118.424
junio	28/06/2025	Nv 3	Proy-138S-113	172.00	1.280	9.63	3.917	118.846
junio	29/06/2025	Nv 3	Proy-138S-114	174.00	1.300	9.81	3.925	114.919
junio	30/06/2025	Nv 3	Proy-138S-115	171.00	1.330	9.71	3.912	118.626
Promedio				171.30	1.30	9.73	3.966	117.20

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 costo de extracción del 2025.

Durante el mes 3 del segundo trimestre, correspondiente a junio de 2025, los resultados operativos mantuvieron una tendencia estable en todos los indicadores evaluados, con una producción promedio de 171.30 TPD y un avance por disparo de 1.30 m. La producción diaria se mantuvo dentro de un rango de 167 a 175 TPD, evidenciando continuidad operativa sin mejoras sustanciales en el rendimiento del frente. En términos de fragmentación, el P80 promedio fue de 9.73 pulgadas, con valores que oscilaron entre 9.55 y 9.99 pulgadas, lo que confirma que la fragmentación se mantuvo en rangos relativamente gruesos, con presencia de material sobredimensionado. Esta condición continuó afectando la eficiencia del proceso de carguío y el desarrollo óptimo del ciclo de mina.

Por otro lado, el factor de carga promedio fue de 3.966 kg/m³, mostrando una ligera variación entre 3.912 y 4.011 kg/m³, lo cual evidencia una dosificación constante del explosivo, pero sin una optimización en su distribución energética dentro del macizo rocoso. En cuanto al costo unitario de extracción, se registró un promedio de 117.20 USD/T, manteniéndose en niveles elevados y con fluctuaciones entre 114.03 y 119.66 USD/T. Estos resultados reflejan que, pese a la estabilidad operativa, la ausencia de un rediseño técnico de voladura continuó limitando la eficiencia del proceso, manteniendo una fragmentación poco favorable y costos elevados, lo que reafirma la necesidad de implementar una optimización del diseño de voladura para mejorar el desempeño técnico y económico de la operación.

Tabla 9*Parámetros de julio del 2025*

Mes	Fecha	Nivel	Proyecto	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
julio	1/07/2025	Nv 3	Proy-138S-116	204.00	1.60	7.78	4.160	91.12
julio	2/07/2025	Nv 3	Proy-138S-117	202.00	1.58	8.12	4.135	92.91
julio	3/07/2025	Nv 3	Proy-138S-118	201.00	1.58	7.83	4.182	90.44
julio	4/07/2025	Nv 3	Proy-138S-119	203.00	1.65	8.03	4.214	91.99
julio	5/07/2025	Nv 3	Proy-138S-120	205.00	1.63	8.02	4.177	91.47
julio	6/07/2025	Nv 3	Proy-138S-121	205.00	1.58	8.01	4.108	93.20
julio	7/07/2025	Nv 3	Proy-138S-122	200.00	1.58	8.04	4.165	94.23
julio	8/07/2025	Nv 3	Proy-138S-123	203.00	1.62	7.99	4.106	91.67
julio	9/07/2025	Nv 3	Proy-138S-124	201.00	1.63	8.10	4.207	93.16
julio	10/07/2025	Nv 3	Proy-138S-125	207.00	1.65	7.99	4.173	90.43
julio	11/07/2025	Nv 3	Proy-138S-126	204.00	1.59	7.81	4.162	92.37
julio	12/07/2025	Nv 3	Proy-138S-127	206.00	1.58	7.92	4.154	93.08
julio	13/07/2025	Nv 3	Proy-138S-128	201.00	1.63	7.92	4.122	90.81
julio	14/07/2025	Nv 3	Proy-138S-129	205.00	1.65	8.00	4.128	92.73
julio	15/07/2025	Nv 3	Proy-138S-130	198.00	1.62	7.94	4.139	90.97
julio	16/07/2025	Nv 3	Proy-138S-131	198.00	1.63	8.14	4.106	93.15
julio	17/07/2025	Nv 3	Proy-138S-132	201.00	1.61	7.96	4.220	91.94
julio	18/07/2025	Nv 3	Proy-138S-133	205.00	1.59	8.05	4.185	92.46
julio	19/07/2025	Nv 3	Proy-138S-134	199.00	1.59	8.06	4.189	94.38
julio	20/07/2025	Nv 3	Proy-138S-135	202.00	1.62	7.80	4.151	94.03
julio	21/07/2025	Nv 3	Proy-138S-136	207.00	1.62	7.90	4.197	92.95
julio	22/07/2025	Nv 3	Proy-138S-137	201.00	1.63	7.87	4.209	91.30
julio	23/07/2025	Nv 3	Proy-138S-138	199.00	1.62	8.00	4.163	92.01
julio	24/07/2025	Nv 3	Proy-138S-139	207.00	1.61	7.97	4.146	91.80
julio	25/07/2025	Nv 3	Proy-138S-140	199.00	1.62	8.07	4.159	90.01
julio	26/07/2025	Nv 3	Proy-138S-141	207.00	1.62	7.96	4.107	92.19
julio	27/07/2025	Nv 3	Proy-138S-142	203.00	1.64	7.80	4.104	90.41
julio	28/07/2025	Nv 3	Proy-138S-143	198.00	1.59	8.10	4.140	91.06
julio	29/07/2025	Nv 3	Proy-138S-144	201.00	1.59	7.96	4.148	91.69
julio	30/07/2025	Nv 3	Proy-138S-145	200.00	1.64	8.06	4.173	91.50
julio	31/07/2025	Nv 3	Proy-138S-146	199.00	1.61	7.85	4.198	94.45
Promedio				202.29	1.61	7.97	4.159	92.13

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 costo de extracción del 2025.

Durante el mes 1 del tercer trimestre, correspondiente a julio de 2025, los resultados operativos evidenciaron una mejora significativa en comparación con el segundo trimestre, reflejando el impacto de la optimización del diseño de voladura. La producción promedio alcanzó 202.29 TPD, mostrando un incremento considerable respecto a los meses anteriores, con valores diarios que oscilaron entre 198 y 207 TPD. Asimismo, el avance por disparo se incrementó a un promedio de 1.61 m, evidenciando una mayor eficiencia en el aprovechamiento de la longitud de perforación y una mejora en el rendimiento del frente de avance.

En cuanto a la fragmentación, el P80 promedio fue de 7.97 pulgadas, con valores que fluctuaron entre 7.78 y 8.14 pulgadas, lo que indica una reducción significativa del tamaño de fragmentos y una mayor uniformidad granulométrica del material volado. Esta mejora se encuentra asociada a una mejor distribución de la energía explosiva, reflejada en un factor de carga promedio de 4.159 kg/m³, superior al registrado en el segundo trimestre. Por otro lado, el costo unitario de extracción disminuyó a un promedio de 92.13 USD/T, con valores entre 90.01 y 94.45 USD/T, evidenciando una reducción sustancial de costos operativos. En conjunto, los resultados de julio confirman que la optimización del diseño de voladura permitió mejorar la fragmentación, incrementar la productividad y reducir los costos, validando la efectividad de la implementación realizada.

Tabla 10*Parámetros de agosto del 2025*

Mes	Fecha	Nivel	Proyecto	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
agosto	1/08/2025	Nv 3	Proy-138S-147	201.00	1.64	7.93	4.168	91.21
agosto	2/08/2025	Nv 3	Proy-138S-148	203.00	1.58	7.92	4.137	93.43
agosto	3/08/2025	Nv 3	Proy-138S-149	199.00	1.63	7.77	4.220	93.50
agosto	4/08/2025	Nv 3	Proy-138S-150	205.00	1.60	7.80	4.184	93.72
agosto	5/08/2025	Nv 3	Proy-138S-151	201.00	1.59	7.87	4.102	91.19
agosto	6/08/2025	Nv 3	Proy-138S-152	207.00	1.59	7.87	4.101	92.76
agosto	7/08/2025	Nv 3	Proy-138S-153	198.00	1.60	7.94	4.203	93.43
agosto	8/08/2025	Nv 3	Proy-138S-154	200.00	1.59	8.04	4.119	93.92
agosto	9/08/2025	Nv 3	Proy-138S-155	198.00	1.61	7.86	4.118	91.90
agosto	10/08/2025	Nv 3	Proy-138S-156	202.00	1.61	8.11	4.130	94.29
agosto	11/08/2025	Nv 3	Proy-138S-157	199.00	1.64	7.89	4.221	94.27
agosto	12/08/2025	Nv 3	Proy-138S-158	202.00	1.64	7.78	4.175	90.38
agosto	13/08/2025	Nv 3	Proy-138S-159	202.00	1.59	8.09	4.153	93.91
agosto	14/08/2025	Nv 3	Proy-138S-160	200.00	1.64	8.06	4.117	91.09
agosto	15/08/2025	Nv 3	Proy-138S-161	203.00	1.60	8.06	4.183	93.97
agosto	16/08/2025	Nv 3	Proy-138S-162	198.00	1.62	7.94	4.125	90.24
agosto	17/08/2025	Nv 3	Proy-138S-163	201.00	1.60	8.00	4.212	94.39
agosto	18/08/2025	Nv 3	Proy-138S-164	198.00	1.64	7.83	4.195	90.84
agosto	19/08/2025	Nv 3	Proy-138S-165	200.00	1.60	8.14	4.100	93.87
agosto	20/08/2025	Nv 3	Proy-138S-166	198.00	1.60	7.94	4.169	92.72
agosto	21/08/2025	Nv 3	Proy-138S-167	199.00	1.65	8.07	4.198	90.99
agosto	22/08/2025	Nv 3	Proy-138S-168	202.00	1.65	8.10	4.132	92.04
agosto	23/08/2025	Nv 3	Proy-138S-169	204.00	1.65	7.93	4.133	94.38
agosto	24/08/2025	Nv 3	Proy-138S-170	205.00	1.63	8.02	4.171	93.87
agosto	25/08/2025	Nv 3	Proy-138S-171	200.00	1.59	8.01	4.102	90.49
agosto	26/08/2025	Nv 3	Proy-138S-172	201.00	1.61	8.07	4.170	92.40
agosto	27/08/2025	Nv 3	Proy-138S-173	205.00	1.60	8.13	4.101	91.68
agosto	28/08/2025	Nv 3	Proy-138S-174	204.00	1.64	7.85	4.112	90.60
agosto	29/08/2025	Nv 3	Proy-138S-175	199.00	1.58	8.10	4.199	91.55
agosto	30/08/2025	Nv 3	Proy-138S-176	206.00	1.58	8.10	4.218	94.12
agosto	31/08/2025	Nv 3	Proy-138S-177	199.00	1.60	7.77	4.217	91.30
Promedio				201.26	1.61	7.97	4.158	92.53

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 costo de extracción del 2025.

Durante el mes 2 del tercer trimestre, correspondiente a agosto de 2025, los resultados operativos mantuvieron la tendencia de mejora observada en el mes anterior, evidenciando una operación optimizada y estable. La producción promedio alcanzó 201.26 TPD, con valores diarios que oscilaron entre 198 y 207 TPD, lo que confirma un incremento sostenido en la capacidad productiva del frente. Asimismo, el avance por disparo se mantuvo en un promedio de 1.61 m, reflejando una operación controlada y eficiente, donde el diseño de voladura permitió aprovechar adecuadamente la longitud de los taladros y mantener un rendimiento constante en el ciclo de minado.

En cuanto a la fragmentación, el P80 promedio fue de 7.97 pulgadas, con valores que variaron entre 7.77 y 8.14 pulgadas, lo que evidencia una fragmentación homogénea y significativamente menor en comparación con el segundo trimestre. Esta mejora está asociada a una mejor distribución de la energía explosiva, reflejada en un factor de carga promedio de 4.158 kg/m³, el cual se mantuvo constante durante el mes. Por otro lado, el costo unitario de extracción registró un promedio de 92.53 USD/T, manteniéndose en niveles bajos y con variaciones controladas entre 90.24 y 94.39 USD/T. En conjunto, los resultados de agosto confirman la sostenibilidad de la mejora implementada, evidenciando que la optimización del diseño de voladura permitió mantener una fragmentación adecuada, alta productividad y reducción de costos operativos de manera consistente.

Tabla 11*Parámetros de septiembre del 2025*

Mes	Fecha	Nivel	Proyecto	TPD	M	P80	KG/M3	USD/T
septiembre	1/09/2025	Nv 3	Proy-138S-178	201.00	1.61	7.95	4.183	90.90
septiembre	2/09/2025	Nv 3	Proy-138S-179	205.00	1.59	7.76	4.166	93.68
septiembre	3/09/2025	Nv 3	Proy-138S-180	203.00	1.58	7.78	4.104	90.51
septiembre	4/09/2025	Nv 3	Proy-138S-181	200.00	1.63	7.94	4.215	94.39
septiembre	5/09/2025	Nv 3	Proy-138S-182	200.00	1.59	7.87	4.219	91.62
septiembre	6/09/2025	Nv 3	Proy-138S-183	205.00	1.63	7.88	4.105	93.08
septiembre	7/09/2025	Nv 3	Proy-138S-184	206.00	1.59	8.11	4.101	92.58
septiembre	8/09/2025	Nv 3	Proy-138S-185	200.00	1.59	8.00	4.159	92.52
septiembre	9/09/2025	Nv 3	Proy-138S-186	199.00	1.65	7.86	4.148	94.15
septiembre	10/09/2025	Nv 3	Proy-138S-187	199.00	1.59	8.10	4.142	92.76
septiembre	11/09/2025	Nv 3	Proy-138S-188	203.00	1.63	8.06	4.202	90.65
septiembre	12/09/2025	Nv 3	Proy-138S-189	207.00	1.65	7.82	4.196	92.47
septiembre	13/09/2025	Nv 3	Proy-138S-190	202.00	1.60	7.76	4.213	91.17
septiembre	14/09/2025	Nv 3	Proy-138S-191	201.00	1.61	8.00	4.135	93.72
septiembre	15/09/2025	Nv 3	Proy-138S-192	200.00	1.63	7.90	4.123	90.31
septiembre	16/09/2025	Nv 3	Proy-138S-193	206.00	1.60	7.93	4.133	93.26
septiembre	17/09/2025	Nv 3	Proy-138S-194	204.00	1.63	7.80	4.198	90.37
septiembre	18/09/2025	Nv 3	Proy-138S-195	206.00	1.58	7.99	4.221	93.39
septiembre	19/09/2025	Nv 3	Proy-138S-196	204.00	1.63	7.80	4.196	90.46
septiembre	20/09/2025	Nv 3	Proy-138S-197	200.00	1.62	8.02	4.220	94.33
septiembre	21/09/2025	Nv 3	Proy-138S-198	202.00	1.62	7.79	4.102	93.78
septiembre	22/09/2025	Nv 3	Proy-138S-199	207.00	1.62	7.84	4.103	91.74
septiembre	23/09/2025	Nv 3	Proy-138S-200	199.00	1.59	7.99	4.132	93.00
septiembre	24/09/2025	Nv 3	Proy-138S-201	202.00	1.59	7.82	4.153	93.66
septiembre	25/09/2025	Nv 3	Proy-138S-202	202.00	1.64	8.03	4.201	91.04
septiembre	26/09/2025	Nv 3	Proy-138S-203	205.00	1.64	7.90	4.138	90.43
septiembre	27/09/2025	Nv 3	Proy-138S-204	201.00	1.58	8.07	4.116	92.32
septiembre	28/09/2025	Nv 3	Proy-138S-205	198.00	1.62	7.92	4.120	91.09
septiembre	29/09/2025	Nv 3	Proy-138S-206	201.00	1.63	7.93	4.155	90.44
septiembre	30/09/2025	Nv 3	Proy-138S-207	204.00	1.64	8.14	4.120	92.64
Promedio				202.40	1.61	7.93	4.157	92.22

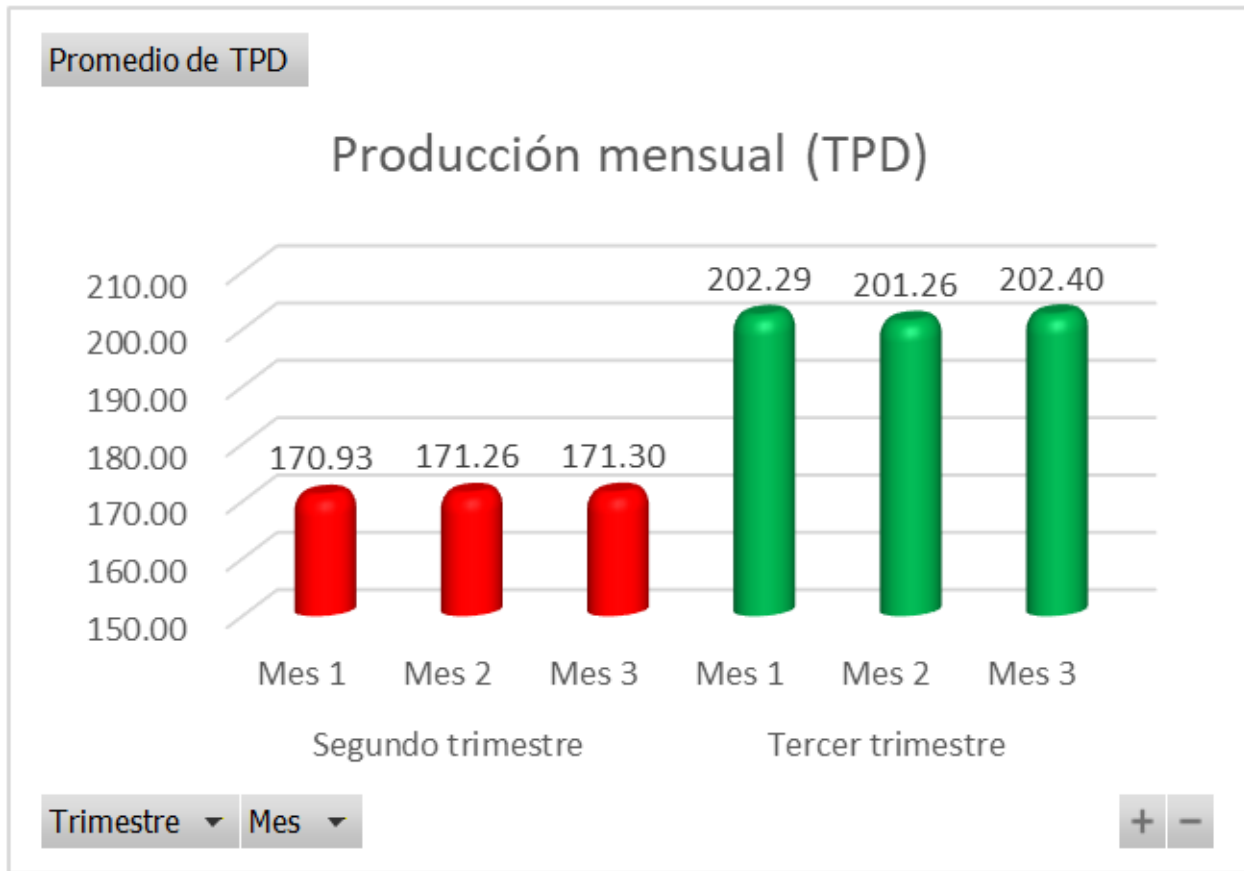
Nota: Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de septiembre del primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), avance por disparo, fragmentación. (P80), factor de carga y costo de extracción del 2025.

Durante el mes 3 del tercer trimestre, correspondiente a septiembre de 2025, los resultados operativos evidenciaron la consolidación de la optimización del diseño de voladura, manteniendo un desempeño eficiente y estable en todos los indicadores evaluados. La producción promedio alcanzó 202.40 TPD, con valores diarios que oscilaron entre 198 y 207 TPD, lo que confirma la sostenibilidad del incremento productivo logrado en los meses anteriores. Asimismo, el avance por disparo se mantuvo en 1.61 m, evidenciando una operación controlada y con alta eficiencia en el aprovechamiento de la perforación, sin variaciones significativas que afecten la continuidad del ciclo de minado.

En cuanto a la fragmentación, el P80 promedio fue de 7.93 pulgadas, con valores que fluctuaron entre 7.76 y 8.14 pulgadas, lo que indica una fragmentación uniforme y controlada, manteniéndose dentro de rangos óptimos para el proceso de carguío. Esta condición se encuentra directamente relacionada con un factor de carga promedio de 4.157 kg/m³, el cual evidencia una adecuada distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso. Por otro lado, el costo unitario de extracción alcanzó un promedio de 92.22 USD/T, manteniéndose en niveles bajos y con variaciones controladas entre 90.31 y 94.39 USD/T. En conjunto, los resultados de septiembre confirman que la mejora implementada no solo fue efectiva, sino también sostenible en el tiempo, logrando una operación optimizada con alta productividad, fragmentación adecuada y reducción consistente de costos operativos.

Figura 14.

Producción mensual

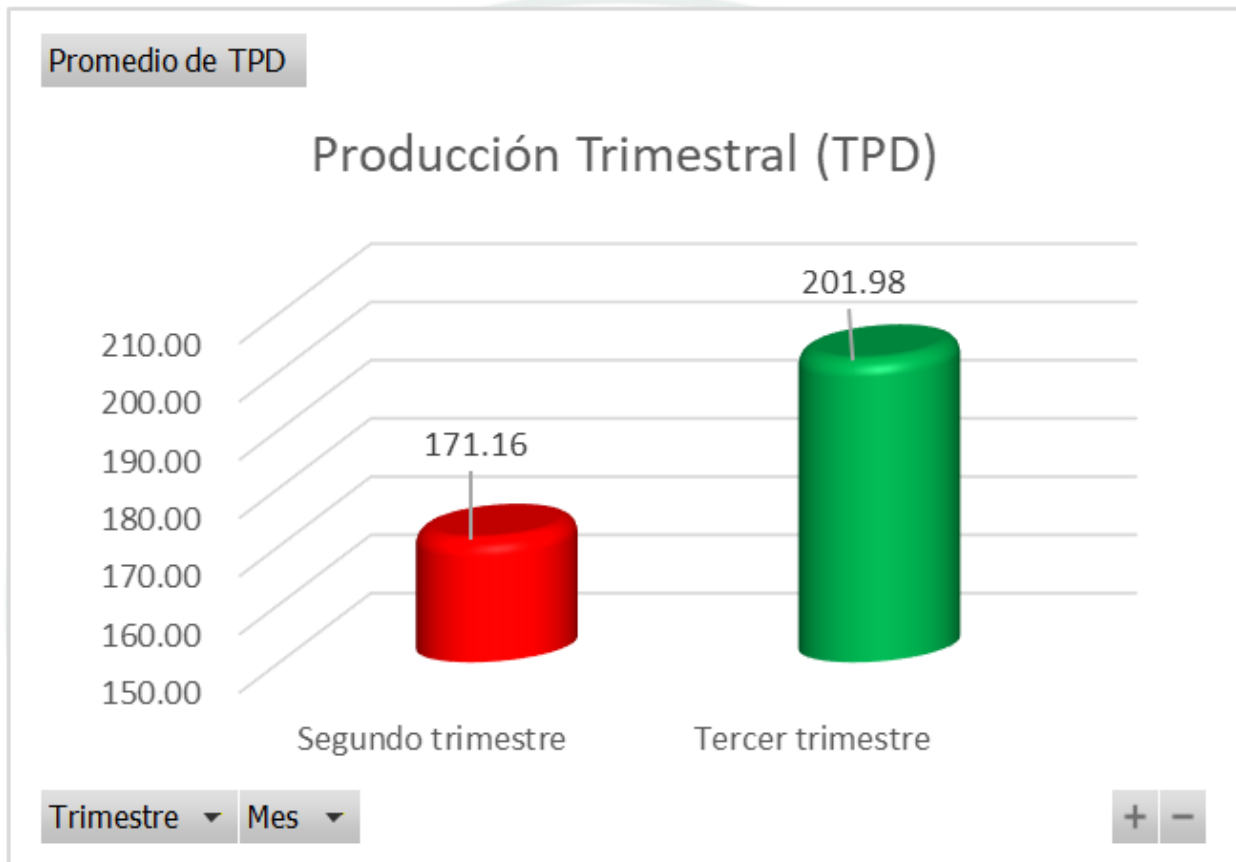


Nota: La figura de producción mensual. (TPD) evidencia claramente el impacto de la optimización del diseño de voladura al comparar el segundo y tercer trimestre del año 2025. Durante el segundo trimestre, la producción se mantuvo prácticamente constante, con valores de 170.93, 171.26 y 171.30 TPD, lo que refleja una operación estable pero sin mejoras en el rendimiento del frente. En contraste, en el tercer trimestre se observa un incremento significativo de la producción, alcanzando valores de 202.29, 201.26 y 202.40 TPD, lo que representa un aumento sostenido en todos los meses evaluados. Esta mejora está directamente relacionada con la optimización de la fragmentación y el incremento del avance por disparo, lo que permitió una mayor eficiencia en el proceso de carguío y continuidad en el ciclo de minado. En conjunto, la

gráfica confirma que la implementación del rediseño de voladura generó un incremento productivo consistente, validando su efectividad en la operación minera.

Figura 15.

Producción trimestral

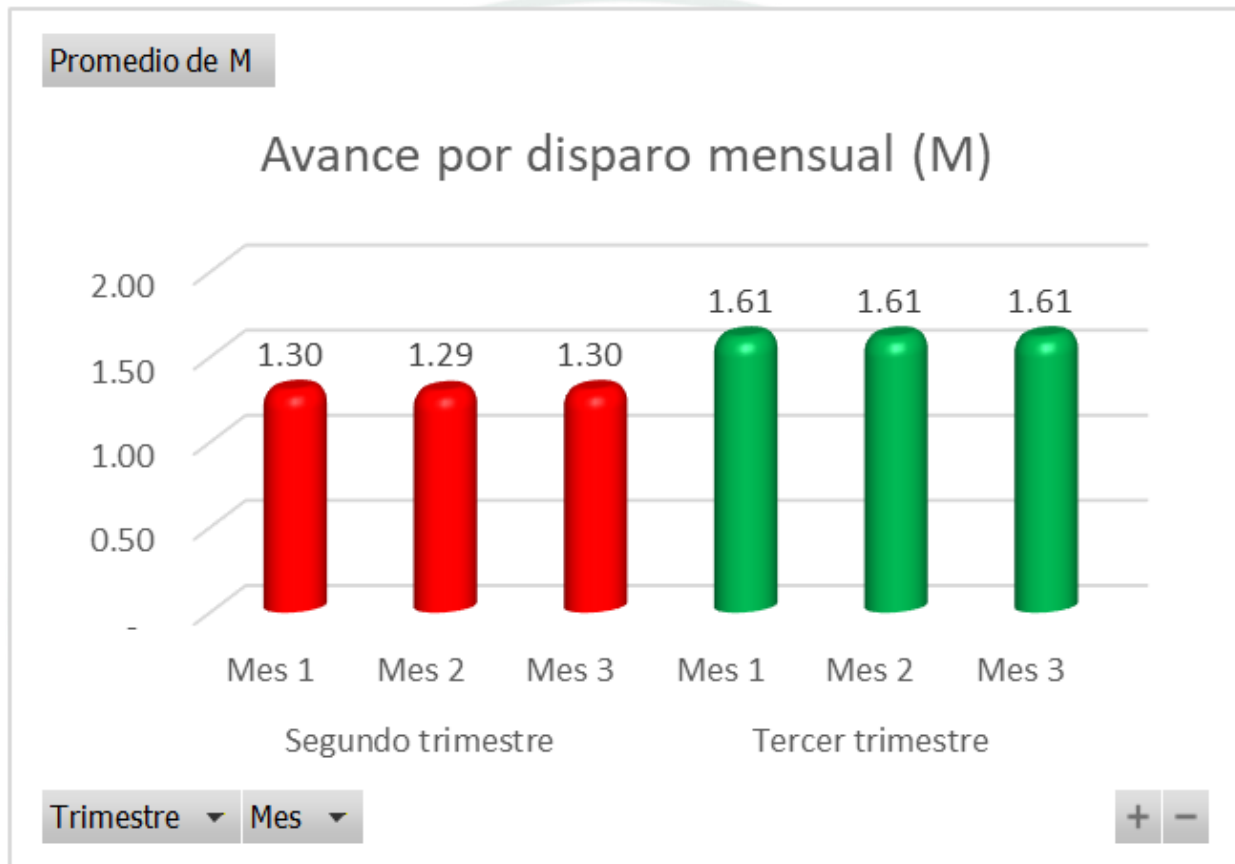


Nota: La gráfica de producción trimestral. (TPD) muestra de manera clara el efecto de la optimización del diseño de voladura al comparar ambos periodos evaluados. En el segundo trimestre, la producción promedio fue de 171.16 TPD, reflejando una operación estable pero sin mejoras en el rendimiento del frente de avance. Sin embargo, en el tercer trimestre, tras la implementación del rediseño de voladura, la producción se incrementó a 201.98 TPD, evidenciando una mejora significativa del 18.01%. Este incremento sostenido demuestra que la optimización de la fragmentación y el mayor avance por disparo permitieron mejorar la eficiencia del proceso de minado, logrando una mayor capacidad productiva. En conjunto, la

gráfica confirma que la implementación del diseño optimizado de voladura tuvo un impacto directo y positivo en la producción, validando su efectividad técnica y operativa.

Figura 16.

Avance por disparo mensual



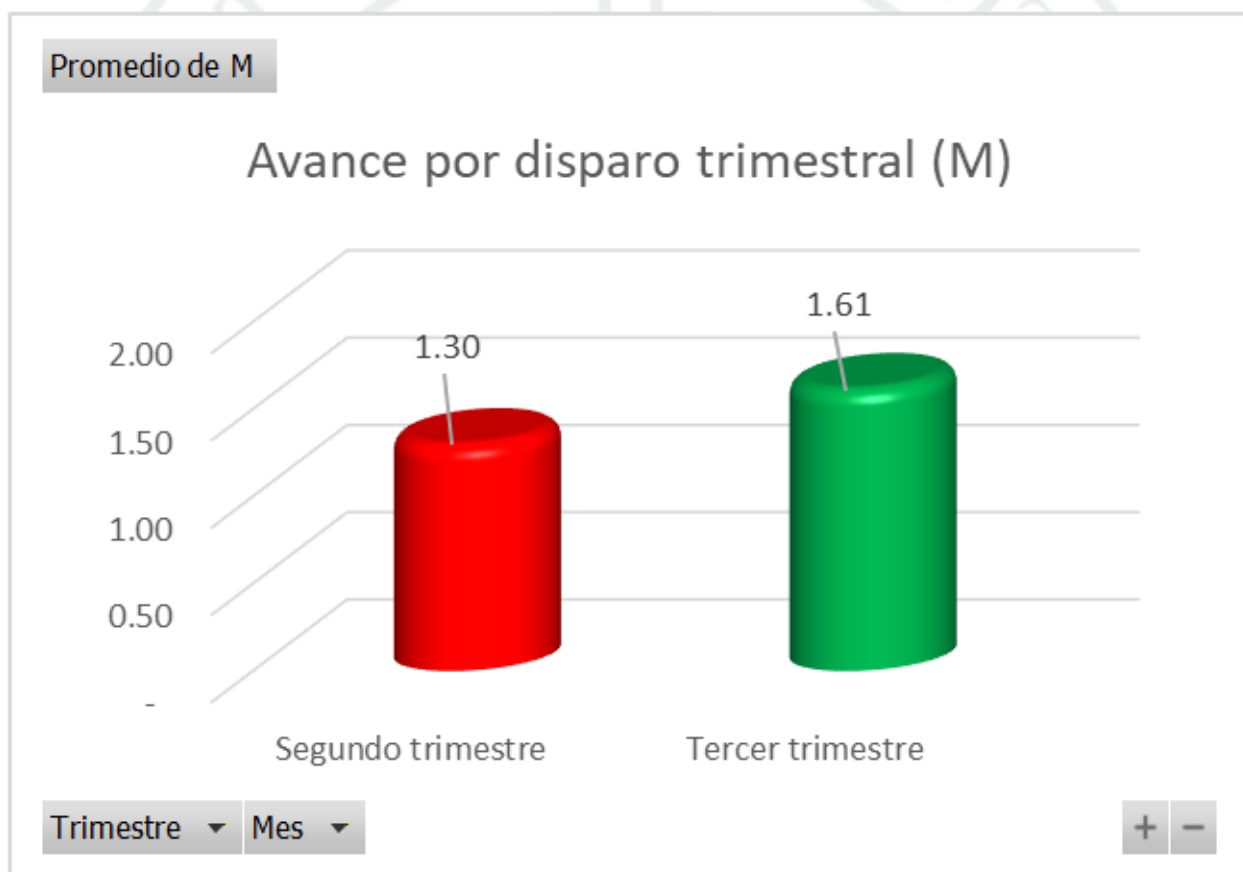
Nota: El gráfico muestra la comparación mensual del tiempo promedio de avance por disparo entre ambos trimestres del 2025.

La gráfica de avance por disparo mensual. (M) evidencia una mejora clara y sostenida en el rendimiento del frente de avance tras la optimización del diseño de voladura. Durante el segundo trimestre, el avance se mantuvo prácticamente constante en valores de 1.30, 1.29 y 1.30 m, reflejando una operación estable pero sin mejoras en la eficiencia del disparo. En contraste, en el tercer trimestre se observa un incremento significativo, alcanzando un valor constante de 1.61 m en los tres meses, lo que representa una mejora aproximada del 24.40%. Este incremento

demuestra que el rediseño de la voladura permitió un mejor aprovechamiento de la longitud de perforación y una mayor eficiencia en la fragmentación del macizo rocoso, reduciendo pérdidas de energía y mejorando la continuidad del ciclo de minado. En conjunto, la gráfica confirma que la optimización aplicada tuvo un impacto directo en el incremento del avance por disparo, consolidando una operación más eficiente y productiva.

Figura 17.

Avance por disparo trimestral

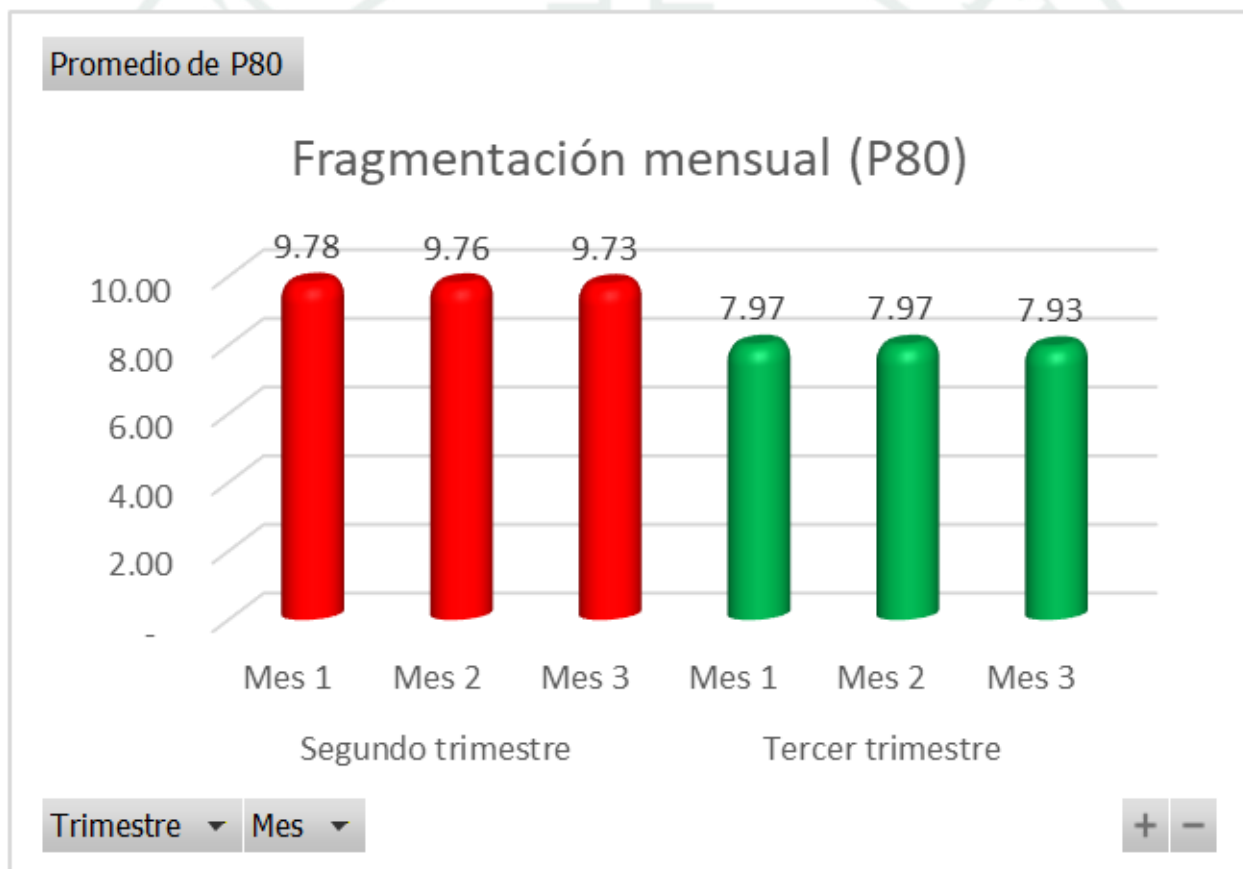


Nota: La gráfica de avance por disparo trimestral. (M) muestra de manera clara el impacto de la optimización del diseño de voladura en el rendimiento del frente de avance. En el segundo trimestre, el avance promedio fue de 1.30 m, reflejando una operación estable pero limitada en eficiencia debido a un diseño de voladura convencional. En contraste, en el tercer trimestre el avance se incrementó a 1.61 m, lo que representa una mejora del 24.40%. Este incremento

evidencia que el rediseño de la malla de perforación, junto con una mejor distribución de la energía explosiva, permitió un mayor aprovechamiento de la longitud de los taladros y una fragmentación más eficiente del macizo rocoso. En conjunto, la gráfica confirma que la optimización aplicada tuvo un efecto directo y positivo en el incremento del avance por disparo, contribuyendo significativamente a mejorar la productividad del proceso de minado.

Figura 18.

Fragmentación mensual

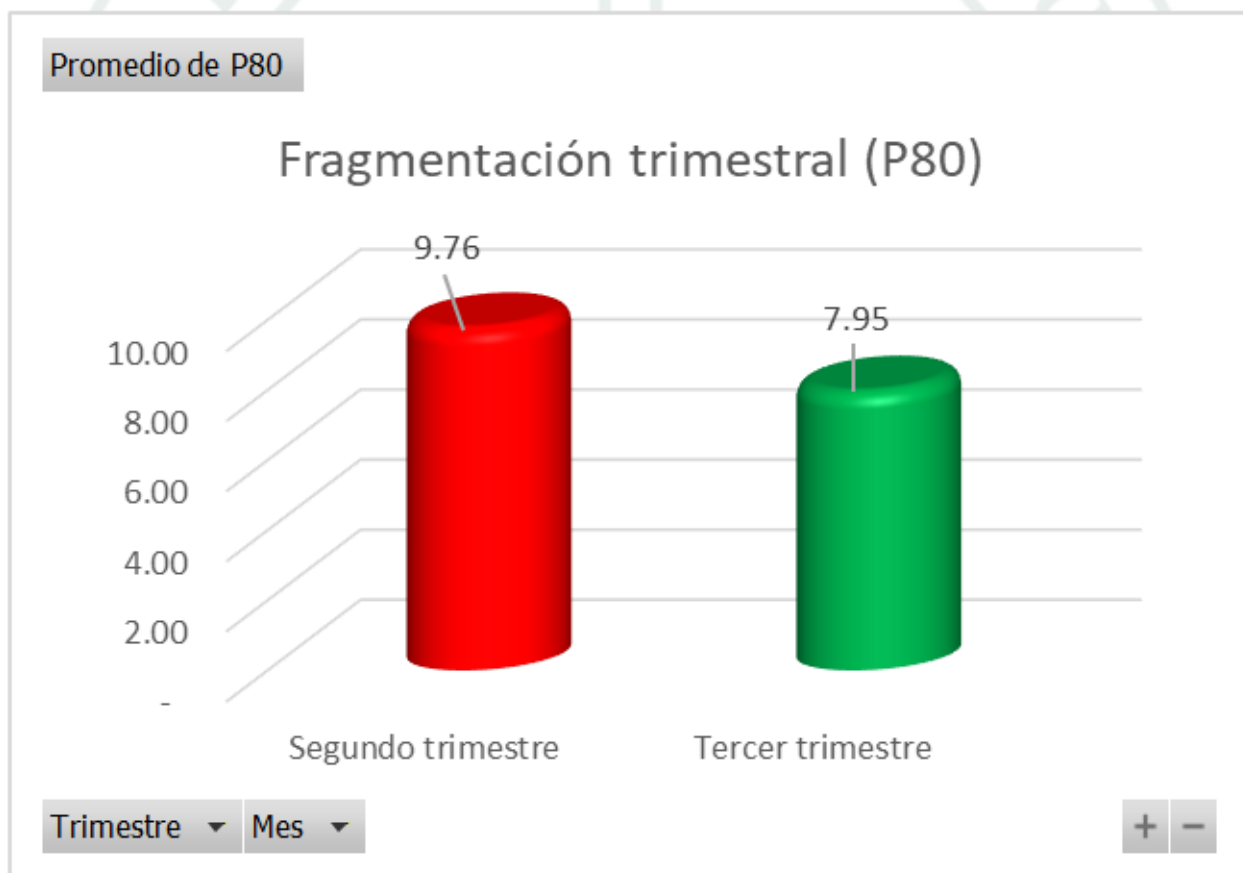


Nota: La gráfica de fragmentación mensual. (P80) evidencia una mejora significativa en la granulometría del material volado tras la optimización del diseño de voladura. Durante el segundo trimestre, el P80 se mantuvo en valores elevados de 9.78, 9.76 y 9.73 pulgadas, lo que indica una fragmentación relativamente gruesa y la presencia de material sobredimensionado. En contraste, en el tercer trimestre se observa una reducción considerable del tamaño de fragmentos,

alcanzando valores de 7.97, 7.97 y 7.93 pulgadas, lo que representa una disminución aproximada del 18.47%. Esta mejora refleja una adecuada distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso, generando una fragmentación más uniforme y favorable para el proceso de carguío. En conjunto, la gráfica confirma que la optimización del diseño de voladura permitió reducir el tamaño de fragmentación, incrementando la eficiencia operativa y contribuyendo a la disminución de costos en el proceso de minado.

Figura 19.

Fragmentación trimestral

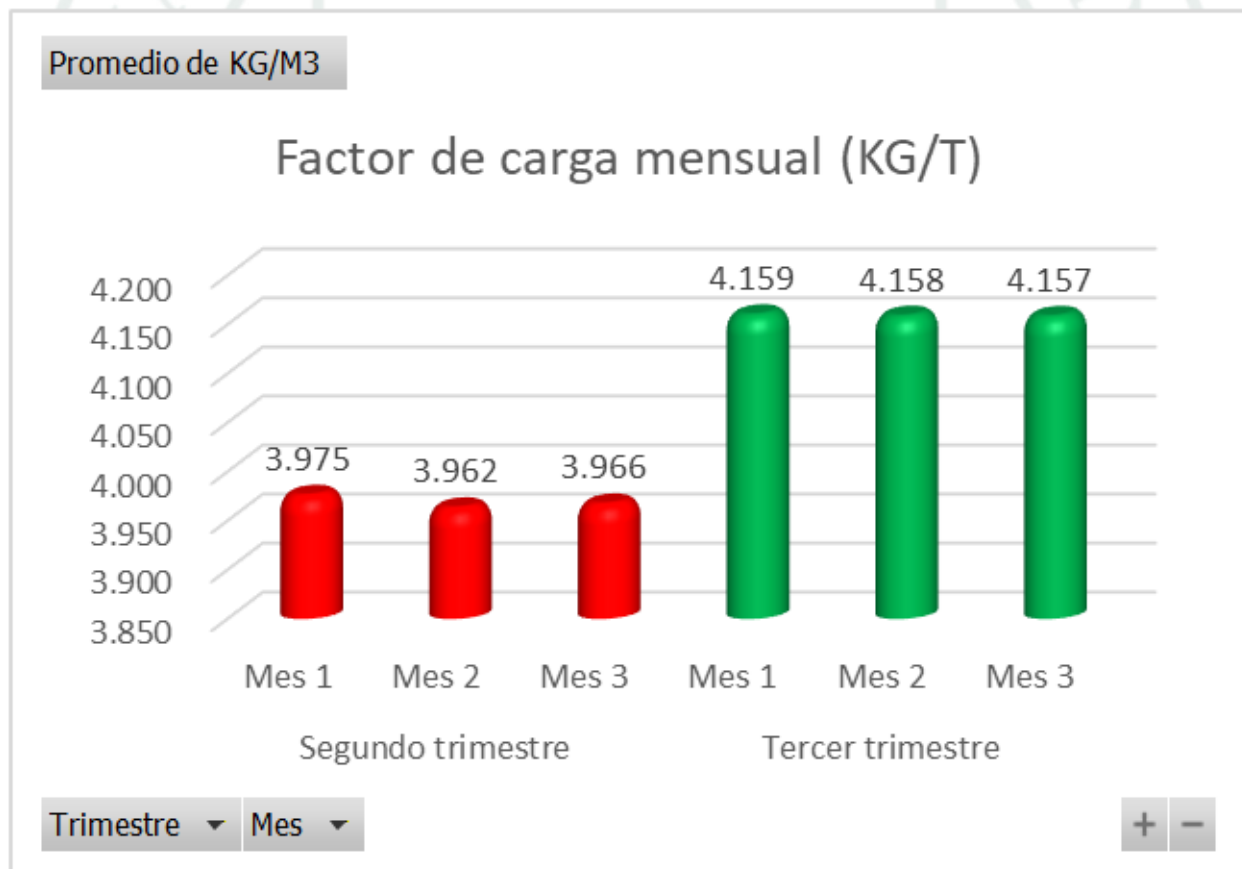


Nota: La gráfica de fragmentación trimestral. (P80) evidencia de manera clara el efecto de la optimización del diseño de voladura en la reducción del tamaño de los fragmentos. En el segundo trimestre, el P80 promedio fue de 9.76 pulgadas, lo que refleja una fragmentación relativamente gruesa y con presencia de material sobredimensionado. En contraste, en el tercer

trimestre el P80 se redujo a 7.95 pulgadas, representando una mejora del 18.47% en la granulometría del material volado. Esta disminución del tamaño de fragmentación indica una mejor distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso, lo que permitió obtener una fragmentación más uniforme y adecuada para el proceso de carguío. En conjunto, la gráfica confirma que la optimización del diseño de voladura tuvo un impacto directo en la mejora de la fragmentación, contribuyendo significativamente a incrementar la eficiencia operativa y reducir los costos de extracción.

Figura 20.

Factor de carga mensual

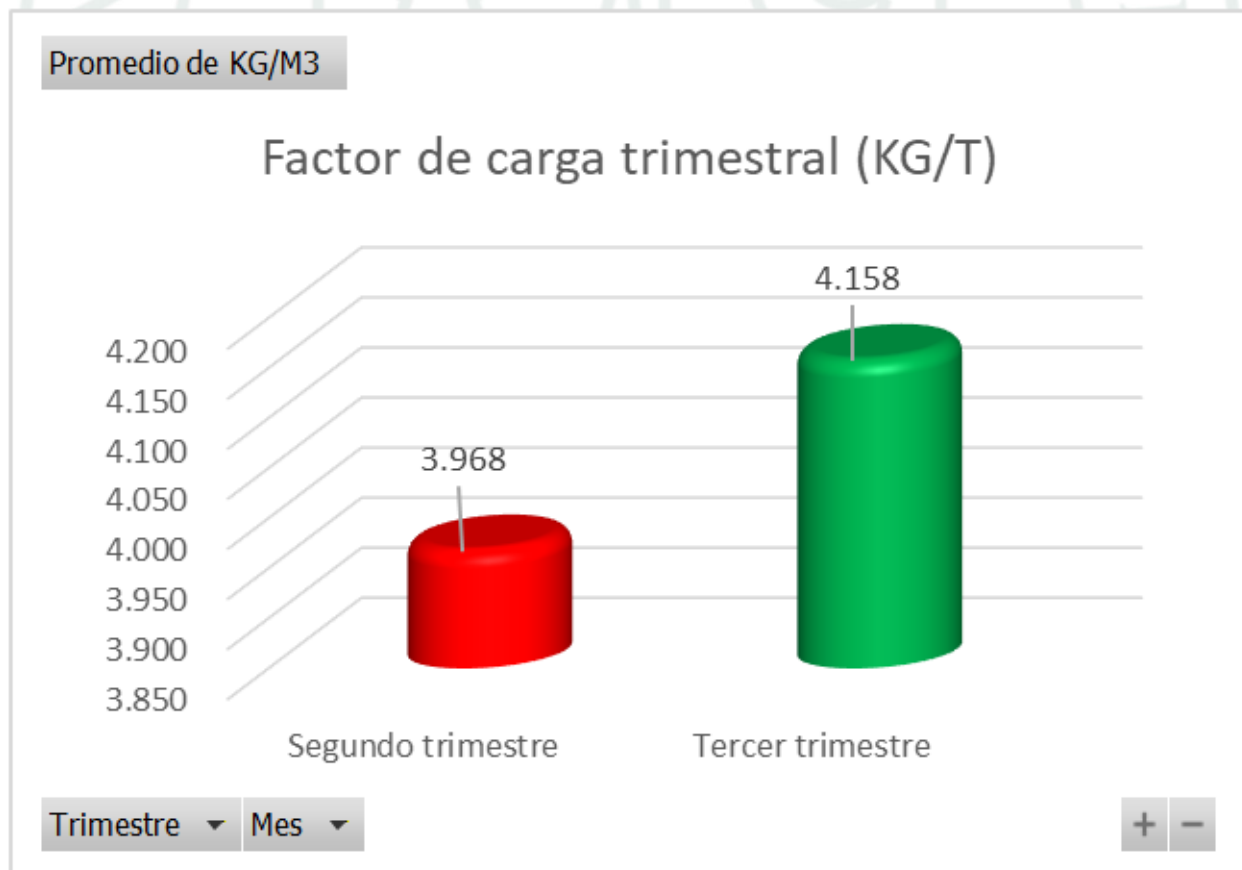


Nota: La gráfica del factor de carga mensual. (KG/m³) muestra una variación controlada entre el segundo y tercer trimestre, evidenciando una optimización en la distribución de la energía explosiva. Durante el segundo trimestre, los valores se mantuvieron en 3.975, 3.962 y 3.966

kg/m³, lo que refleja una dosificación constante pero sin un enfoque técnico optimizado. En contraste, en el tercer trimestre se observa un ligero incremento a 4.159, 4.158 y 4.157 kg/m³, lo que representa una variación aproximada del 4.79%. Este aumento controlado del factor de carga permitió mejorar la fragmentación del macizo rocoso sin generar un sobreconsumo de explosivo, evidenciando una mejor eficiencia en el uso de la energía aplicada. En conjunto, la gráfica confirma que la optimización del diseño de voladura no solo incrementó el consumo de explosivo de manera moderada, sino que lo distribuyó de forma más eficiente, contribuyendo directamente a la mejora de la fragmentación y al incremento de la productividad del proceso de minado.

Figura 21.

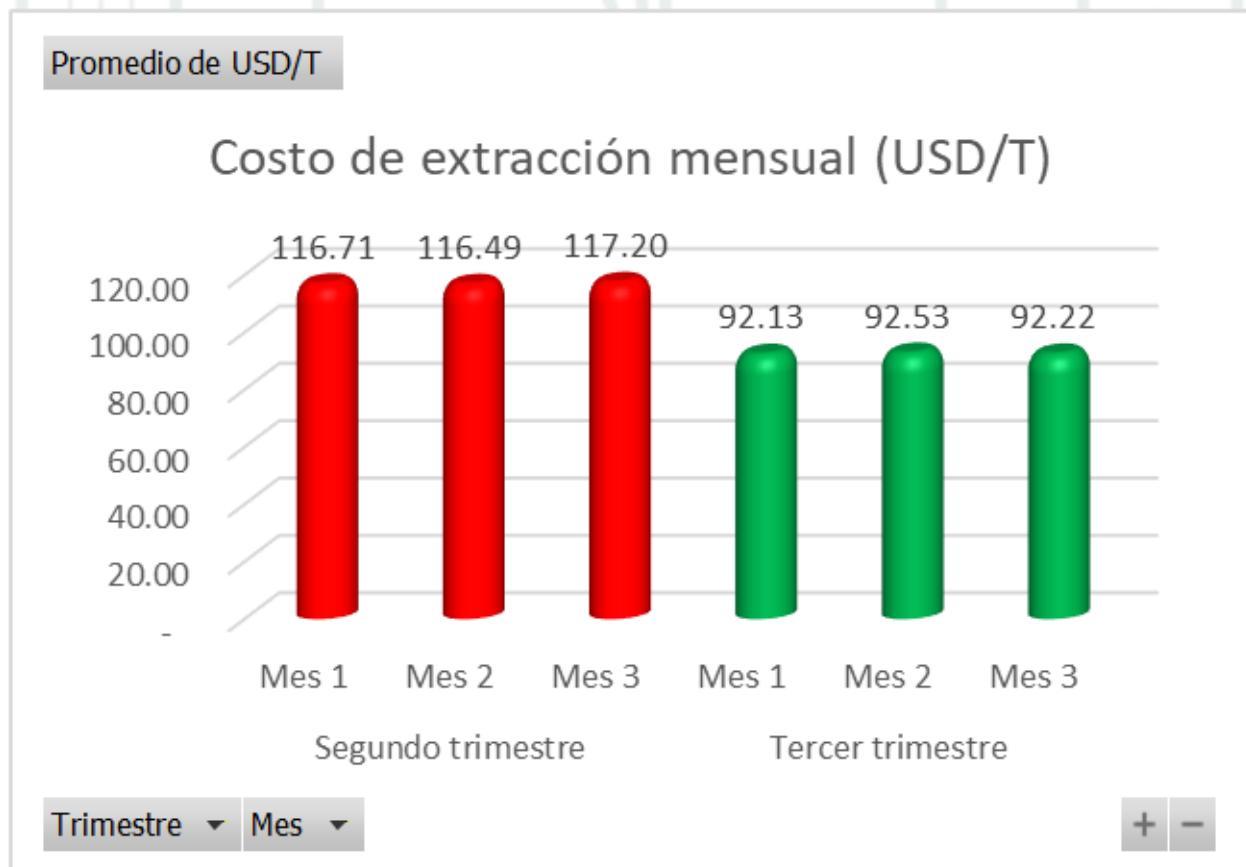
Factor de carga trimestral



Nota: La gráfica del factor de carga trimestral. (KG/m³) muestra una variación controlada entre ambos periodos, evidenciando una mejora en la distribución de la energía explosiva tras la optimización del diseño de voladura. En el segundo trimestre, el factor de carga promedio fue de 3.968 kg/m³, reflejando una dosificación uniforme pero sin criterios de optimización. En el tercer trimestre, este valor se incrementó a 4.158 kg/m³, lo que representa una variación del 4.79%. Este incremento moderado no implicó un sobreconsumo de explosivo, sino una mejor aplicación de la energía en el macizo rocoso, lo que permitió obtener una fragmentación más eficiente y uniforme. En conjunto, la gráfica confirma que el aumento controlado del factor de carga contribuyó directamente a mejorar el rendimiento de la voladura, favoreciendo el incremento de la productividad y la reducción de los costos operativos.

Figura 22.

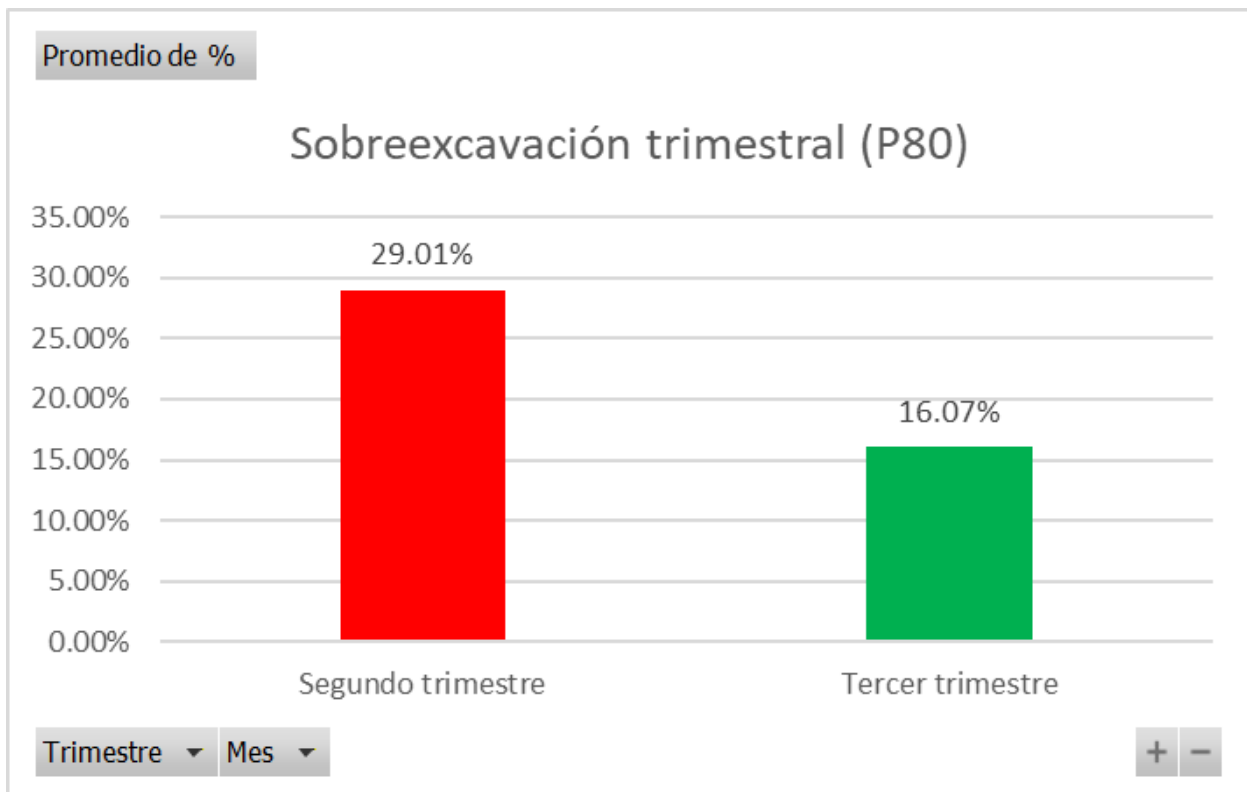
Costo de extracción mensual



Nota: La gráfica de costo de extracción mensual. (USD/T) evidencia una reducción significativa y sostenida de los costos operativos tras la optimización del diseño de voladura. Durante el segundo trimestre, los costos se mantuvieron elevados, con valores de 116.71, 116.49 y 117.20 USD/T, reflejando una operación con fragmentación poco eficiente y mayores tiempos de limpieza. En contraste, en el tercer trimestre se observa una disminución notable, alcanzando valores de 92.13, 92.53 y 92.22 USD/T, lo que representa una reducción aproximada del 20.98% en todos los meses evaluados. Esta disminución está directamente relacionada con la mejora en la fragmentación, el incremento del avance por disparo y la optimización del ciclo de minado, lo que permitió reducir tiempos improductivos y eliminar la necesidad de voladura secundaria. En conjunto, la gráfica confirma que la optimización del diseño de voladura tuvo un impacto directo en la eficiencia económica de la operación, logrando una reducción consistente de los costos de extracción.

Figura 23.

Costo de extracción trimestral



Nota: La gráfica de costo de extracción trimestral. (USD/T) muestra de manera contundente el impacto de la optimización del diseño de voladura en la eficiencia económica de la operación. En el segundo trimestre, el costo promedio se ubicó en 116.80 USD/T, reflejando una operación con fragmentación menos eficiente, mayores tiempos de limpieza y presencia de reprocesos. En contraste, en el tercer trimestre el costo se redujo a 92.29 USD/T, lo que representa una disminución significativa del 20.98%. Esta reducción está directamente asociada a la mejora en la fragmentación del material volado, el incremento del avance por disparo y la optimización del ciclo de minado, lo que permitió disminuir tiempos improductivos y eliminar la necesidad de voladura secundaria. En conjunto, la gráfica confirma que la implementación del rediseño de voladura no solo mejoró los indicadores técnicos, sino que generó un impacto directo y sostenible en la reducción de los costos operativos de la mina.

4.9 Resultados generales

El análisis comparativo entre el segundo trimestre. (sin optimización) y el tercer trimestre. (con implementación) evidenció mejoras significativas en todos los indicadores operativos evaluados en el Nivel 3 Galería GL 138S. En términos de producción. (TPD), se registró un incremento de 171.16 a 201.98 TPD, lo que representa una mejora del 18.01%, reflejando una mayor eficiencia del ciclo de minado. Este incremento estuvo directamente asociado al mejor desempeño del frente de avance producto de la optimización de la voladura.

Respecto al avance por disparo. (M), se observó un incremento de 1.30 m a 1.61 m, equivalente a una mejora del 24.40%, lo que evidencia un mejor aprovechamiento de la longitud de perforación y una mayor eficiencia en la liberación de energía explosiva. Este resultado permitió reducir el número de disparos requeridos para avanzar una misma longitud, optimizando el tiempo del ciclo operativo.

En cuanto a la fragmentación. (P80), se obtuvo una reducción significativa de 9.76 a 7.95 pulgadas, representando una mejora del 18.47%. Este resultado indica una fragmentación más fina y uniforme del macizo rocoso, lo que favoreció el proceso de carguío, redujo la presencia de material sobredimensionado y eliminó la necesidad de voladura secundaria.

El factor de carga. (KG/m³) presentó un incremento controlado de 3.968 a 4.158 kg/m³, equivalente a una variación del 4.79%, lo que evidencia una mejor distribución de la energía explosiva en el frente de avance. Este ajuste técnico permitió mejorar la fragmentación sin generar un sobreconsumo significativo de explosivo.

Finalmente, el costo unitario de extracción. (USD/T) mostró una reducción considerable de 116.80 a 92.29 USD/T, lo que representa una disminución del 20.98%. Esta reducción se encuentra directamente relacionada con la mejora en la fragmentación, el incremento del avance

por disparo y la optimización del ciclo de minado, lo que permitió disminuir tiempos improductivos y costos operativos.

Tabla 12

Comparativo de resultados: segundo vs tercer trimestre

Indicador	Segundo Trimestre	Tercer Trimestre	Variación	Interpretación
TPD. (Producción)	171.16	201.98	18.01%	Incremento de la productividad
M. (Avance/disparo)	1.3	1.61	24.40%	Mayor eficiencia del disparo
P80. (pulgadas)	9.76	7.95	-18.47%	Mejora de la fragmentación
KG/m ³ . (Factor de carga)	3.968	4.158	4.79%	Mejor distribución de energía
USD/T. (Costo)	116.8	92.29	-20.98%	Reducción de costos operativos

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

4.10 Análisis

El análisis integral de los resultados evidenció que la optimización del diseño de voladura generó un cambio significativo en el desempeño del proceso de avance en el Nivel 3 Galería GL 138S. Durante el segundo trimestre, los indicadores operativos mostraron un comportamiento estable pero limitado, caracterizado por una fragmentación relativamente gruesa, un avance por disparo reducido y costos elevados. En contraste, en el tercer trimestre se observó una mejora consistente en todos los indicadores, lo que demuestra que la implementación del modelo de Holmberg, la simulación con JKSimBlast y el control con Split Desktop permitió optimizar la interacción entre los parámetros de perforación y la energía explosiva aplicada al macizo rocoso.

Desde el punto de vista productivo, el incremento del 18.01% en la producción. (TPD) se encuentra directamente relacionado con el aumento del avance por disparo en 24.40%, lo cual evidencia que el rediseño de la voladura permitió un mayor aprovechamiento de la longitud de los taladros. Este resultado indica que la energía explosiva fue mejor distribuida, logrando una rotura más eficiente del macizo rocoso y reduciendo las pérdidas de energía. En consecuencia, se logró una mayor continuidad en el ciclo de minado, disminuyendo los tiempos muertos y mejorando la eficiencia global del proceso.

En relación con la fragmentación, la reducción del P80 en 18.47% constituye uno de los resultados más relevantes de la investigación, ya que evidencia una mejora directa en la calidad del material volado. Una fragmentación más fina y uniforme permitió facilitar el proceso de carguío, reducir la presencia de material sobredimensionado y eliminar la necesidad de voladura secundaria. Este comportamiento confirma que la optimización del burden, espaciamiento y factor de carga permitió una adecuada liberación y distribución de la energía explosiva dentro del macizo rocoso, generando una granulometría más favorable para las operaciones posteriores.

Por otro lado, el incremento controlado del factor de carga en 4.79% no representó un sobreconsumo de explosivo, sino una mejora en su eficiencia de uso. Este resultado demuestra que no solo es importante la cantidad de explosivo utilizada, sino su correcta distribución en el diseño de la voladura. La adecuada relación entre carga explosiva y volumen de roca permitió maximizar la eficiencia de fragmentación, contribuyendo directamente al incremento del avance por disparo y a la mejora de la productividad.

En términos económicos, la reducción del 20.98% en el costo unitario de extracción refleja el impacto directo de la optimización técnica sobre la eficiencia financiera de la operación. Esta disminución se explica por la mejora en la fragmentación, que redujo los tiempos

de limpieza, eliminó reprocesos y optimizó el uso de equipos. Asimismo, el incremento en la producción permitió diluir los costos fijos, generando una operación más rentable.

En conjunto, los resultados analizados demuestran que la optimización del diseño de voladura no solo mejoró los indicadores técnicos del proceso de minado, sino que también generó beneficios económicos significativos. La relación directa entre fragmentación, avance y costos confirma que una adecuada planificación y diseño de la voladura constituye un factor clave para incrementar la productividad y competitividad de las operaciones mineras subterráneas.

4.10.1 Análisis detallado de la reducción de costos y mejora de fragmentación

Con el propósito de fortalecer el análisis de resultados, se incorporaron tablas y gráficos comparativos detallados que permiten visualizar de manera más precisa el impacto de la optimización del diseño de voladura sobre los indicadores de fragmentación y costos de extracción entre el segundo y tercer trimestre de 2025.

Tabla 13

Comparativa consolidada de indicadores

Indicador	Segundo trimestre	Tercer trimestre	Variación. (%)
Producción. (TPD)	171.16	201.98	+18.01%
Avance por disparo. (M)	1.30	1.61	+24.40%
Fragmentación P80. (pulg)	9.76	7.95	-18.47%
Factor de carga. (KG/m ³)	3.968	4.158	+4.79%
Costo de extracción. (USD/T)	116.80	92.29	-20.98%

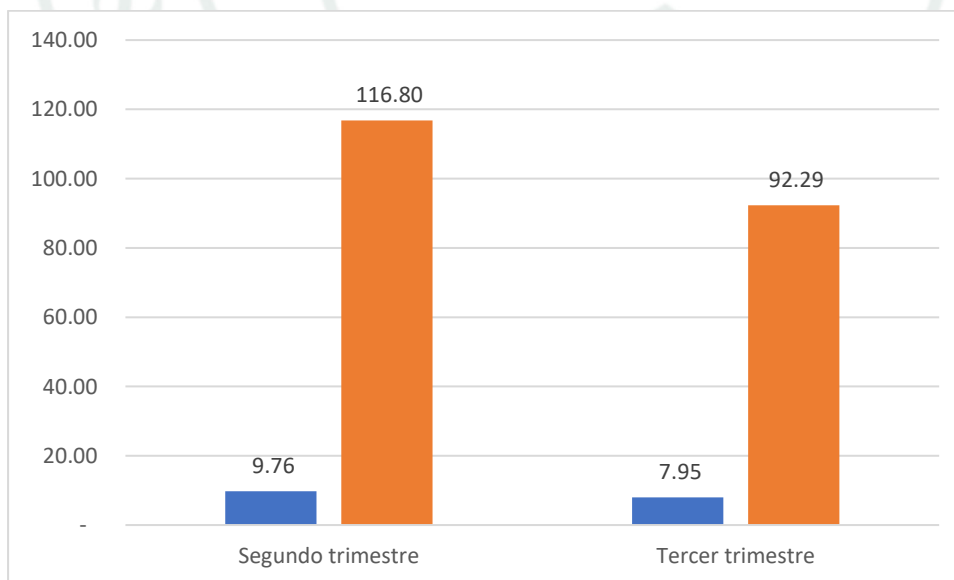
Nota: Comparación consolidada de indicadores operativos y económicos entre el segundo trimestre sin optimización y el tercer trimestre con implementación del diseño optimizado de voladura. Elaboración propia, 2025.

La tabla evidencia que el incremento controlado del factor de carga en 4.79% permitió mejorar significativamente la fragmentación del material volado, reduciendo el P80 de 9.76 a 7.95 pulgadas, lo que representa una mejora del 18.47%. Esta reducción indica una granulometría más uniforme y menor presencia de sobredimensionados, mejorando la eficiencia del carguío y eliminando reprocesos asociados a voladura secundaria.

Desde el punto de vista económico, la mejora de la fragmentación y el incremento del avance por disparo impactaron directamente en la reducción del costo unitario de extracción, el cual disminuyó de 116.80 USD/T a 92.29 USD/T, equivalente a una reducción del 20.98%. Esto demuestra que una mejor distribución de energía explosiva no solo mejora indicadores técnicos, sino que también optimiza el rendimiento económico del proceso.

Figura 24.

Relación fragmentación vs costo de extracción



Nota: Comparación de la relación entre la fragmentación del material volado. (P80) y el costo unitario de extracción. (USD/T) entre el segundo trimestre sin optimización y el tercer trimestre con implementación de la mejora en el diseño de voladura. Se observa que la reducción del tamaño característico de fragmentación de 9.76 a 7.95 pulgadas estuvo directamente asociada con la disminución del costo de extracción de 116.80 a 92.29 USD/T, evidenciando que una fragmentación más uniforme y eficiente contribuyó significativamente a mejorar el desempeño económico del proceso de extracción en el Nivel 3 Galería GL 138S. Elaboración propia, 2025.

El gráfico permite visualizar de manera clara la relación entre la optimización del diseño de voladura, la mejora en la fragmentación y la reducción de costos operativos. La representación comparativa facilita identificar la magnitud de la mejora obtenida y refuerza la interpretación técnica de que una fragmentación más eficiente contribuye directamente a optimizar el desempeño económico de la operación minera.

4.11 Discusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la optimización del diseño de voladura tiene una influencia directa en la fragmentación, productividad y costos de operación, lo cual coincide con lo planteado por Holmberg y Persson. (1979), quienes establecen que una adecuada relación entre burden, espaciamiento y carga explosiva permite mejorar la distribución de la energía en el macizo rocoso. En este estudio, la aplicación del modelo de Holmberg permitió incrementar el avance por disparo de 1.30 m a 1.61 m, lo que valida que un diseño técnicamente optimizado mejora la eficiencia del frente de avance, tal como lo señalan dichos autores.

Asimismo, los resultados de fragmentación obtenidos mediante Split Desktop, donde el P80 se redujo en 18.47%, son coherentes con lo indicado por Cunningham. (1983) en el modelo

Kuz-Ram, quien sostiene que la fragmentación depende de la relación entre el volumen de roca y la carga explosiva, así como de las condiciones del macizo rocoso. En la presente investigación, el incremento controlado del factor de carga permitió mejorar la granulometría del material volado, confirmando que una adecuada dosificación de explosivo contribuye a obtener una fragmentación más uniforme y eficiente.

Por otro lado, los resultados obtenidos coinciden con lo expuesto por López Jimeno, Jimeno y Carcedo. (1995), quienes señalan que la fragmentación adecuada del macizo rocoso es un factor clave para mejorar el rendimiento del carguío y reducir los costos operativos. En este estudio, la reducción del P80 permitió eliminar la presencia de material sobredimensionado, lo que se tradujo en una disminución significativa del costo unitario de extracción en 20.98%, evidenciando la relación directa entre fragmentación y eficiencia económica.

De igual manera, los resultados son consistentes con lo planteado por Persson, Holmberg y Lee. (1994), quienes indican que la eficiencia de la voladura no depende únicamente de la cantidad de explosivo, sino de su correcta distribución dentro del macizo rocoso. En la investigación, el incremento del factor de carga en 4.79% no generó un sobreconsumo, sino una mejora en la eficiencia del uso de la energía explosiva, lo que permitió optimizar la fragmentación y aumentar la productividad del proceso de minado.

En relación con antecedentes de tesis, los resultados coinciden con lo reportado por Rojas. (2023), quien en su investigación sobre optimización de voladura en la Minera Magistral de Huaraz concluyó que la mejora en el diseño de malla de perforación incrementa el avance por disparo y reduce la variabilidad de la fragmentación. De manera similar, en la presente investigación se logró un incremento del avance del 24.40%, confirmando que la optimización de los parámetros de voladura tiene un impacto directo en la eficiencia del frente.

Asimismo, los resultados guardan relación con lo expuesto por González y Martínez. (2021), quienes determinaron que la optimización de los parámetros de perforación y voladura en minería subterránea permite reducir los costos operativos mediante una mejora en la fragmentación. En el presente estudio, la reducción del costo unitario de extracción en 20.98% confirma esta afirmación, evidenciando que la fragmentación adecuada es un factor determinante en la eficiencia económica del proceso.

Finalmente, los resultados también coinciden con lo señalado por López. (2022), quien concluye que el uso de herramientas de simulación como software especializado permite optimizar el diseño de voladura y mejorar los resultados operativos. En esta investigación, la aplicación de JKSimBlast y Split Desktop permitió validar los resultados obtenidos en campo, demostrando que el uso de herramientas tecnológicas contribuye significativamente a la mejora del proceso de minado.

En conjunto, la discusión con autores y tesis permite afirmar que los resultados obtenidos en la presente investigación no solo son coherentes con la literatura especializada, sino que también refuerzan la importancia de la optimización del diseño de voladura como un factor clave para mejorar la productividad, la fragmentación y la eficiencia económica en minería subterránea.

El incremento del factor de carga en 4.79%. (de 3.968 a 4.158 kg/m³), aunque aparentemente moderado, generó una mejora significativa en la fragmentación. (-18.47% en P80) y en el avance por disparo. (+24.40%) Este comportamiento se explica porque la eficiencia de la voladura no depende únicamente de la cantidad de explosivo, sino principalmente de la forma en que la energía es distribuida y confinada dentro del macizo rocoso.

En el segundo trimestre, el diseño de voladura presentaba una distribución de energía menos eficiente, donde parte de la energía explosiva se disipaba sin contribuir efectivamente a la rotura del macizo, generando fragmentación gruesa y limitando el avance. Con la optimización del diseño en el tercer trimestre, el ajuste del burden y espaciamiento, basado en el modelo de Holmberg y validado con JKSimBlast, permitió que el ligero incremento del factor de carga se tradujera en una mayor concentración de energía por unidad de volumen de roca en zonas críticas, mejorando el mecanismo de fracturamiento. Esto provocó una transición desde una rotura incompleta hacia una rotura más eficiente, lo que explica la reducción significativa del P80.

Asimismo, el comportamiento de la fragmentación frente a la energía explosiva es no lineal, es decir, pequeños incrementos en la energía pueden generar cambios significativos cuando el sistema se encuentra cerca de un umbral crítico de fracturamiento. En este caso, el incremento de 4.79% permitió superar ese umbral, logrando una mejor interacción entre las ondas de choque y las discontinuidades del macizo, favoreciendo la propagación de grietas y la liberación del material.

Por otro lado, la mejora en la fragmentación tuvo un efecto directo en el avance por disparo, ya que una granulometría más fina y uniforme reduce la resistencia del macizo remanente al avance y mejora la eficiencia del corte. Al lograrse una rotura más completa del frente, se incrementó el aprovechamiento de la longitud de los taladros, lo que permitió pasar de 1.30 m a 1.61 m por disparo. En este sentido, el incremento del avance no es consecuencia directa del aumento del explosivo, sino del mejor uso de la energía aplicada.

Finalmente, el resultado obtenido confirma que la optimización del diseño de voladura actúa de manera integral, donde el ajuste geométrico. (burden y espaciamiento) y la dosificación

del explosivo trabajan conjuntamente. El ligero incremento del factor de carga fue efectivo porque se realizó dentro de un diseño optimizado, lo que permitió maximizar la eficiencia energética, mejorar la fragmentación y aumentar el rendimiento del frente sin generar sobreconsumo de explosivos.

4.12 Discusión sobre los límites del incremento del factor de carga

Si bien en la presente investigación el incremento del factor de carga de 3.968 a 4.158 kg/m³ permitió mejorar la fragmentación y el avance por disparo, ello no significa que un aumento continuo del explosivo genere siempre mejores resultados. En voladura subterránea, el factor de carga debe mantenerse dentro de un rango óptimo, ya que un exceso de energía por unidad de volumen puede producir efectos no deseados sobre el contorno de la excavación y el macizo remanente.

Uno de los principales riesgos de incrementar excesivamente el factor de carga es la sobreexcavación, debido a que la energía sobrante puede propagarse más allá de la sección diseñada, generando rotura adicional en los hastiales, techo y piso. Esta condición altera la geometría de la labor, incrementa el volumen de roca removida y puede elevar los costos de sostenimiento, limpieza y control geomecánico. Desde el punto de vista operativo, una sobreexcavación sostenida también reduce la eficiencia del proceso, porque parte de la energía explosiva deja de emplearse en la rotura útil del frente y pasa a generar daño periférico.

Asimismo, un incremento no controlado del factor de carga puede provocar daño al contorno y debilitamiento del macizo remanente, especialmente en zonas donde existen discontinuidades, diaclasas o planos de debilidad. En estas condiciones, la energía explosiva adicional puede inducir microfracturamiento, apertura de juntas y pérdida de confinamiento en la roca circundante, reduciendo la estabilidad de la excavación. Este fenómeno es particularmente

crítico en labores subterráneas, donde la preservación del macizo remanente es esencial para mantener la seguridad del frente y disminuir la necesidad de sostenimiento adicional.

Otro aspecto asociado es el posible incremento de vibraciones y daño inducido, ya que una mayor carga explosiva puede generar una mayor proporción de energía transmitida en forma de ondas sísmicas si no existe una geometría de diseño adecuada que la absorba en la fragmentación. En ese escenario, en lugar de mejorar la granulometría, el exceso de energía puede traducirse en mayores niveles de perturbación del macizo, afectando tanto el contorno como la estabilidad estructural de la labor.

Por ello, los resultados de la presente investigación deben interpretarse dentro del contexto de un incremento controlado y técnicamente sustentado del factor de carga, acompañado del ajuste simultáneo del burden, espaciamiento y distribución de taladros. La mejora obtenida no se debió únicamente al mayor consumo de explosivo, sino a que dicho incremento se mantuvo dentro de un rango óptimo, donde la energía adicional fue aprovechada eficientemente para mejorar la rotura del macizo sin generar daños significativos en el contorno.

En consecuencia, se reconoce que existe un límite técnico a partir del cual incrementos adicionales del factor de carga podrían dejar de ser beneficiosos y pasar a generar sobreexcavación, mayor daño geomecánico y pérdida de estabilidad del macizo remanente. Por ello, cualquier aumento futuro del factor de carga debe evaluarse conjuntamente con el control del contorno, la medición de vibraciones y la observación geomecánica del macizo, a fin de asegurar que la mejora en fragmentación no comprometa la seguridad ni la integridad de la excavación.

4.13 Discusión sobre daño al contorno y estabilidad del macizo

Si bien la investigación se centró principalmente en la mejora de la fragmentación y la reducción de costos, los resultados obtenidos permiten inferir efectos relevantes en el control del daño al contorno y la estabilidad del macizo remanente, aspectos críticos en la voladura subterránea. La optimización del diseño mediante el modelo de Holmberg y su validación con JKSimBlast favoreció una mejor distribución de la energía explosiva, lo que no solo impactó en la granulometría del material volado, sino también en la forma y estabilidad de la excavación.

La reducción del P80 y la mayor uniformidad de la fragmentación indican que la energía explosiva fue empleada de manera más eficiente en la rotura del macizo, disminuyendo la energía sobrante que normalmente se disipa hacia el contorno en forma de vibraciones y daño inducido. Este comportamiento sugiere una disminución del daño en la zona periférica de la excavación, lo cual es consistente con lo planteado por Holmberg y Persson, quienes señalan que un diseño adecuado de burden, espaciamiento y secuencia de iniciación permite controlar la propagación de fracturas hacia el macizo remanente. (Holmberg & Persson, 1979)

Asimismo, el control de la energía en los taladros perimetrales contribuyó a reducir la sobreexcavación, permitiendo mantener una sección más cercana al diseño teórico de la labor. La sobreexcavación, común en diseños no optimizados, genera inestabilidad, mayor consumo de sostenimiento y aumento de costos indirectos. En este caso, la mejora en el diseño de voladura permitió limitar este efecto, favoreciendo una excavación más estable y geométricamente controlada.

En relación con las vibraciones inducidas por la voladura, aunque no fueron medidas directamente en la investigación, la mejora en la eficiencia de fragmentación y la adecuada distribución del factor de carga sugieren una reducción en la energía transmitida en forma de

ondas sísmicas. Una mejor fragmentación implica que la mayor parte de la energía fue utilizada en la rotura del macizo, disminuyendo el impacto dinámico sobre la roca circundante y reduciendo el riesgo de generación de zonas debilitadas o microfracturadas.

Finalmente, la eliminación de la voladura secundaria, producto de la reducción de material sobredimensionado, representa un beneficio adicional en términos de estabilidad geomecánica. Este tipo de voladura suele generar daño adicional en el contorno de la excavación, por lo que su reducción contribuye a preservar la integridad del macizo remanente. En conjunto, estos resultados permiten afirmar que la optimización del diseño de voladura no solo mejoró los indicadores productivos y económicos, sino que también favoreció el control del daño al contorno, la reducción de la sobreexcavación y la mejora de la estabilidad del macizo, aspectos fundamentales para la seguridad y sostenibilidad de las operaciones subterráneas. (Persson et al., 1994)

4.14 Contrastación de hipótesis

4.14.1 Contrastación de la hipótesis general

Los resultados obtenidos en la investigación permiten aceptar la hipótesis general planteada, ya que la optimización del diseño de voladura mediante el uso de JKSimBlast, el modelo de Holmberg y la medición con Split Desktop generó una reducción significativa en los costos de extracción. En el segundo trimestre, el costo unitario promedio fue de 116.80 USD/T, mientras que en el tercer trimestre se redujo a 92.29 USD/T, representando una disminución del 20.98%. Esta reducción estuvo directamente asociada a la mejora en la fragmentación del material volado, el incremento del avance por disparo y la optimización del ciclo de minado. En consecuencia, se demuestra que la implementación

del rediseño de voladura permitió mejorar la eficiencia técnica y económica del proceso, validando la hipótesis general.

4.14.2 Contrastación de la primera hipótesis específica

La primera hipótesis específica se acepta, debido a que la aplicación del rediseño de voladura permitió mejorar significativamente la fragmentación del material volado. Los resultados obtenidos mediante Split Desktop evidenciaron que el tamaño de fragmentación P80 se redujo de 9.76 pulgadas en el segundo trimestre a 7.95 pulgadas en el tercer trimestre, lo que representa una mejora del 18.47%. Asimismo, la curva granulométrica mostró una distribución más uniforme y una disminución del porcentaje de material sobredimensionado. Estos resultados confirman que la optimización del diseño de voladura, basada en el modelo de Holmberg y validada con JKSimBlast, permitió una mejor distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso.

4.14.3 Contrastación de la segunda hipótesis específica

La segunda hipótesis específica también se acepta, ya que la optimización de los parámetros de diseño de voladura, como el burden, espaciamiento y factor de carga, permitió reducir la necesidad de voladura secundaria. Durante el segundo trimestre, la fragmentación gruesa generó la presencia de material sobredimensionado, lo que implicaba reprocesos en el frente de avance. En contraste, en el tercer trimestre, la mejora en la fragmentación permitió obtener un material más homogéneo, eliminando la necesidad de voladura secundaria. Este resultado evidencia que una adecuada relación entre los parámetros de diseño de voladura contribuye directamente a mejorar la eficiencia operativa del proceso de minado.

4.14.4 Contrastación de la tercera hipótesis específica

La tercera hipótesis específica se acepta, debido a que la mejora en la fragmentación obtenida en el tercer trimestre tuvo un impacto directo en la reducción del costo unitario de extracción por metro lineal avanzado. El incremento del avance por disparo de 1.30 m a 1.61 m. (+24.40%) permitió reducir el número de disparos necesarios para avanzar una misma longitud, optimizando el uso de recursos y disminuyendo los tiempos operativos. Asimismo, la reducción del P80 facilitó el proceso de carguío y redujo tiempos de limpieza. Como resultado, el costo unitario disminuyó de 116.80 USD/T a 92.29 USD/T, evidenciando que la mejora en la fragmentación influye directamente en la eficiencia económica del proceso.

En conjunto, la contrastación de hipótesis demuestra que la optimización del diseño de voladura tuvo un impacto positivo significativo en todos los indicadores evaluados, validando tanto la hipótesis general como las hipótesis específicas. Los resultados evidencian que una adecuada planificación y control de la voladura permite mejorar la fragmentación, incrementar la productividad y reducir los costos de extracción, consolidando la importancia de la optimización de este proceso en la minería subterránea.

Conclusiones

Conclusión del objetivo general: Se concluye que la optimización de la voladura en el Nivel 3 Galería GL 138S, mediante la aplicación del software JKSimBlast, el modelo de Holmberg y la medición de fragmentación con Split Desktop, permitió mejorar significativamente el desempeño técnico y económico del proceso de minado. La producción se incrementó de 171.16 TPD a 201.98 TPD. (+18.01%), el avance por disparo aumentó de 1.30 m a 1.61 m. (+24.40%), la fragmentación se redujo de 9.76 a 7.95 pulgadas. (-18.47%) y el costo unitario disminuyó de 116.80 a 92.29 USD/T. (-20.98%), evidenciando que la optimización del diseño de voladura fue efectiva para minimizar los costos de extracción.

Conclusión del primer objetivo específico: Se concluye que la fragmentación del material volado mejoró significativamente en el tercer trimestre, ya que el valor de P80 se redujo en 18.47%, pasando de 9.76 pulgadas a 7.95 pulgadas. Este resultado, validado mediante el software Split Desktop, evidencia una fragmentación más uniforme y una disminución de material sobredimensionado, lo que permitió optimizar el proceso de carguío y mejorar la eficiencia del ciclo de minado.

Conclusión del segundo objetivo específico: Se concluye que el ajuste de los parámetros de diseño de voladura, tales como burden, espaciamiento y factor de carga, permitió mejorar la eficiencia de la voladura y reducir la presencia de material sobredimensionado. El incremento controlado del factor de carga de 3.968 a 4.158 kg/m³. (+4.79%) permitió una mejor distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso, logrando una fragmentación más adecuada y eliminando la necesidad de voladura secundaria en el frente de avance.

Conclusión del tercer objetivo específico: Se concluye que la mejora en la fragmentación obtenida en el tercer trimestre tuvo un impacto directo en la reducción del costo unitario de

extracción. La disminución del P80 y el incremento del avance por disparo permitieron optimizar el ciclo de mina, reduciendo tiempos de limpieza y eliminando reprocesos, lo que se tradujo en una reducción del costo de 116.80 a 92.29 USD/T. (-20.98%) Este resultado confirma que la fragmentación es un factor determinante en la eficiencia económica de la operación minera.



Recomendaciones

Se recomienda implementar de manera permanente el diseño de voladura optimizado en el Nivel 3 Galería GL 138S, utilizando el modelo de Holmberg y la simulación con JKSimBlast, ya que se ha demostrado que estos permiten mejorar la fragmentación, incrementar el avance por disparo y reducir los costos de extracción. Asimismo, es importante estandarizar estos parámetros para su aplicación en otras labores con condiciones geomecánicas similares dentro de la unidad minera.

Se recomienda continuar con el monitoreo sistemático de la fragmentación mediante el software Split Desktop después de cada voladura, con el fin de mantener el control de la granulometría del material volado y realizar ajustes oportunos en los parámetros de diseño. Este seguimiento permitirá asegurar que el P80 se mantenga dentro de los rangos óptimos y evitar la aparición de material sobredimensionado.

Se recomienda optimizar continuamente los parámetros de diseño de voladura, especialmente el burden, espaciamiento y factor de carga, considerando las variaciones del macizo rocoso en cada frente de avance. Para ello, se sugiere realizar evaluaciones periódicas del RMR y ajustar el diseño de voladura en función de las condiciones geomecánicas reales, garantizando una adecuada distribución de la energía explosiva.

Se recomienda capacitar al personal de perforación y voladura en el uso de herramientas tecnológicas como JKSimBlast y Split Desktop, así como en la correcta ejecución del diseño de voladura optimizado. Una adecuada capacitación permitirá reducir errores operativos, mejorar la calidad de la perforación y asegurar el cumplimiento del diseño establecido.

Se recomienda evaluar la implementación de detonadores electrónicos en futuras optimizaciones del proceso de voladura, con el objetivo de mejorar la secuencia de iniciación,

reducir vibraciones y lograr una fragmentación aún más uniforme. Esta tecnología puede contribuir a optimizar aún más el rendimiento del proceso y reducir costos operativos.

Finalmente, se recomienda replicar la metodología aplicada en esta investigación en otras labores y niveles de la unidad minera, con el fin de validar los resultados obtenidos y extender los beneficios de la optimización del diseño de voladura a toda la operación. Esto permitirá consolidar una gestión eficiente del proceso de perforación y voladura, orientada a la mejora continua de la productividad y la reducción de costos.



Referencias bibliográficas

- Aguad Poblete, H. I.. (2024) Optimización de la tronadura de precorte en minería a cielo abierto mediante el uso de explosivos con carga dirigida [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional Universidad de Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/200499/Optimizacion-de-la-tronadura-de-precorte-en-mineria-a-cielo-abierto-mediante-el-uso-de-explosivos-con-carga-dirigida.pdf>
Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.
- Bieniawski, Z. T.. (1989) Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons. Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.
- Chávez, F. Y.. (2015) Mejora de la granulometría mediante el diseño de malla de perforación y voladura aplicando el modelo de Holmberg en la galería 370 de la zona Coturcan en la mina Huancapeti [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unh.edu.pe/bitstreams/4d34848b-6bcf-4d70-a1a3-c75197fd07ec/download> Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.
- Figueiredo, J., Jimeno, C. L., & López Jimeno, E.. (2023) Blasting fragmentation study using 3D image analysis. Applied Sciences, 13(12), 7090. MDPI. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/12/7090>
Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.
- Gómez, L. V., & Pérez, A.. (2024) Incremento de la longitud de avance de la Galería 10146-NE ... [Tesis, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/16372> Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P.. (2014) Metodología de la investigación.

McGraw-Hill. Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Holmberg, R., & Persson, P. A.. (1979) The Swedish approach to contour blasting. Proceedings

of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Fecha de

consulta: 16 de febrero de 2026.

Huincho Quispe, Z.. (2024) Optimización de la perforación y voladura para incrementar el

avance ... [Tesis, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/17024>

Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Hustrulid, W., & Bullock, R.. (2001) Underground mining methods: Engineering fundamentals

and international case studies. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Fecha de

consulta: 16 de febrero de 2026.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A.. (1995) Manual de perforación y voladura de

rocas. Universidad Politécnica de Madrid. Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Konya, C. J., & Walter, E. J.. (1990) Surface blast design. Prentice Hall. Fecha de consulta: 16

de febrero de 2026.

López Jimeno, C., López Jimeno, E., García Bermúdez, P., & Ayala Carcedo, F.. (2017)

Perforación y voladura de rocas en minería. Universidad Politécnica de Madrid. Fecha de

consulta: 16 de febrero de 2026.

Orbezo de la Rosa, Y. R.. (2024) Modelo de malla en perforación y voladura en la optimización

de la fragmentación del avance de By Pass 140 – Nivel 7 Unidad Minera SRML

Magistral de Huaraz S.A.C., UEA Aquia 2022 [Tesis de grado, Universidad Nacional

Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUND_42e860f43a11146d83023860fd2c39

59 Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J.. (1994) Rock blasting and explosives engineering. CRC Press. Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Quispe Roca, F.. (2019) Optimización de perforación y voladura en la explotación por Sublevel Stopping. (taladros largos) – Compañía Minera Shuntur S.A.C., Huaraz [Tesis profesional, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional.
<https://repositorio.unsch.edu.pe/items/6632447c-48cb-4b86-9b4a-5e8838a03c85> Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Rojas Silva, M. A.. (2022) Evaluación de la fragmentación producto de la tronadura en minería subterránea mediante análisis digital de imágenes [Tesis de magíster, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional Universidad de Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186743>
Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.