



Universidad Católica de Santa María

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

**Optimización de la malla de perforación para mejorar la fragmentación y
aumentar la productividad en una mina modelo superficial**

Tesis presentada por:

Tejada Palma, Edson Manuel

ORCID: 0009-0006-5568-4042

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesora:

Dra. López Casaperalta de Diaz, Patricia Yaneth

ORCID: 0000-0001-5853-2833

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA DE MINAS
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 24 de Marzo del 2026

Dictamen: 017308-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 017308, presentado por:

2017202971 - TEJADA PALMA EDSON MANUEL

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DE LA MALLA DE PERFORACIÓN PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN
Y AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN UNA MINA MODELO SUPERFICIAL**

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 MALLA DE PERFORACIÓN PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN Y AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN UNA MINA MODELO SUPERFICIAL

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

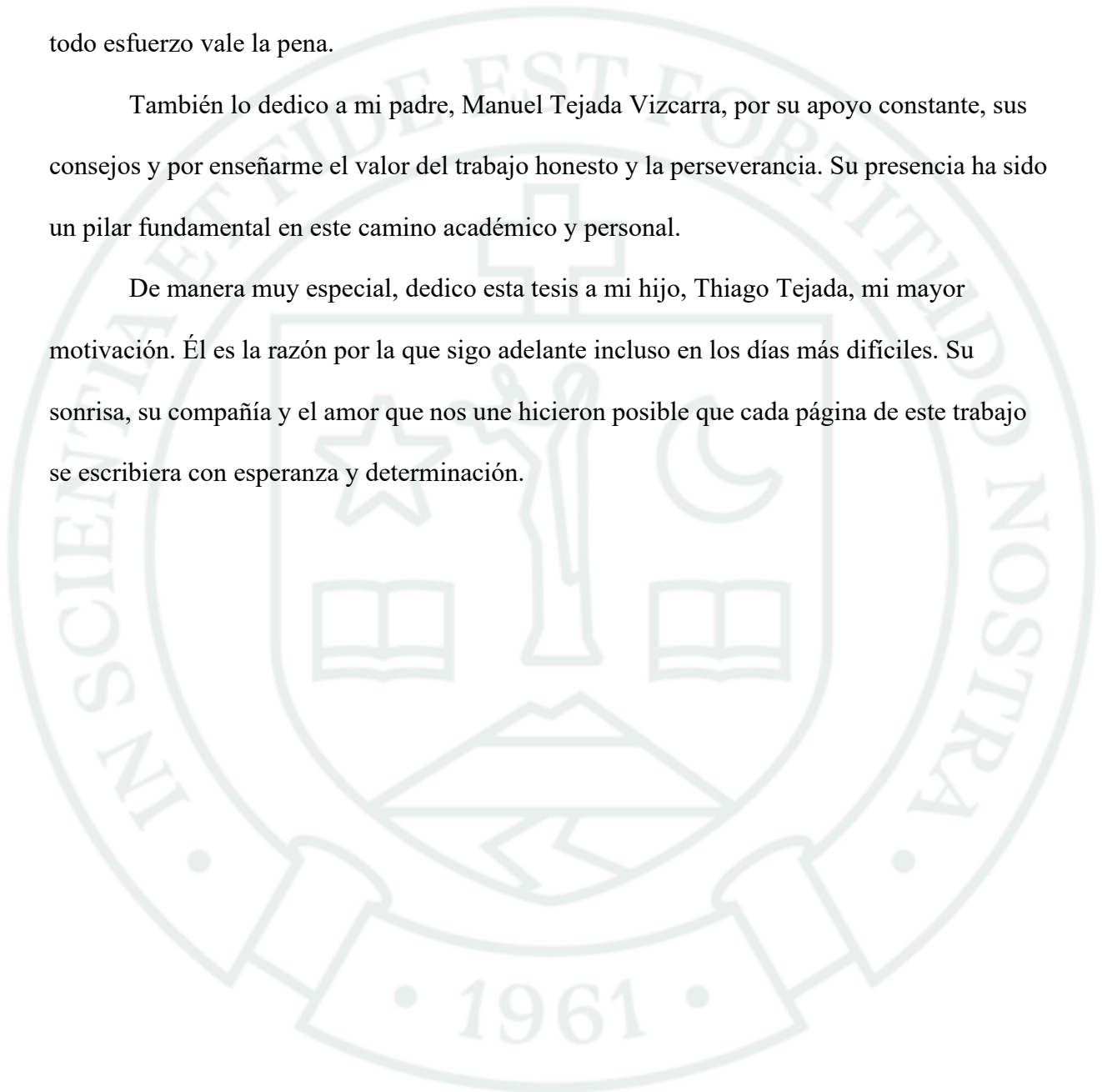
1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	4%
	Trabajo del estudiante	
2	Submitted to uncedu	1%
	Trabajo del estudiante	
3	repositorio.uncp.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.unamba.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.ucsm.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
6	alicia.concytec.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
7	tesis.ucsm.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.upsc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

Dedicatoria

Dedico este trabajo con profundo amor a mi madre, Zandra Palma Cabrera, cuya luz y ejemplo continúan guiando cada paso de mi vida. Su fuerza, sus enseñanzas y su amor incondicional permanecen como el motor que impulsa mis metas y me recuerda siempre que todo esfuerzo vale la pena.

También lo dedico a mi padre, Manuel Tejada Vizcarra, por su apoyo constante, sus consejos y por enseñarme el valor del trabajo honesto y la perseverancia. Su presencia ha sido un pilar fundamental en este camino académico y personal.

De manera muy especial, dedico esta tesis a mi hijo, Thiago Tejada, mi mayor motivación. Él es la razón por la que sigo adelante incluso en los días más difíciles. Su sonrisa, su compañía y el amor que nos une hicieron posible que cada página de este trabajo se escribiera con esperanza y determinación.



Agradecimientos

Agradezco enormemente a Dios por vigilar mis pasos, y por estar obrando en mis decisiones y que todos mis logros pasados y futuros dependan exclusivamente de él.

Agradezco profundamente a mi familia, a mis hermanos y hermanas, que ha sido mi refugio y mi fuerza en cada etapa de este proceso. A mi madre Zandra, por haber sembrado en mí valores que hoy sostienen mis logros; a mi padre Manuel, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento; y a mi hijo Thiago, porque su existencia le da sentido a cada esfuerzo que realizo.

Extiendo mi agradecimiento a los profesionales y compañeros que me brindaron orientación técnica, acceso a información y oportunidades para comprender con mayor profundidad los procesos operativos de la mina. Su apoyo contribuyó significativamente al desarrollo de esta investigación. Finalmente, agradezco a todas las personas que, con gestos de apoyo, paciencia o motivación, hicieron posible que este proyecto culminara con éxito. Cada uno de ellos dejó una huella valiosa en este logro...

Resumen

La investigación evaluó el impacto de la optimización de la malla de perforación sobre la fragmentación del material volado y la productividad minera en una operación modelo superficial durante los primeros seis meses del año 2025. El estudio comparó dos escenarios operativos: el primer trimestre, en el cual se empleó un diseño de voladura convencional, y el segundo trimestre, donde se implementó una malla optimizada ajustada a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso. La fragmentación se midió mediante el software Split Online, mientras que la estimación teórica se realizó utilizando el modelo Kuz-Ram, permitiendo analizar el comportamiento del material frente al incremento del factor de carga y la redistribución de energía explosiva.

La evaluación de los indicadores operativos evidenció mejoras significativas tras la optimización. El tamaño característico P80 se redujo de 8.59" a 6.36". (-25.94%), generando una granulometría más fina y uniforme. De forma complementaria, el tiempo promedio de carguío disminuyó de 2.56 a 2.31 minutos. (-9.68%), reflejando un flujo más eficiente durante los ciclos de operación. Como consecuencia directa, la productividad aumentó de 2,368.98 a 2,721.25 T/H. (+14.86%) y el costo unitario de producción se redujo de 0.68 a 0.61 USD/T. (-10.29%) Estos resultados demostraron que el rediseño de la malla de perforación generó beneficios técnicos, operativos y económicos, confirmando que un diseño de voladura correctamente ajustado contribuye a mejorar la eficiencia global del ciclo de minado.

Palabras claves: perforación, fragmentación, productividad.

Abstract

This research evaluated the effect of an optimized drilling pattern on rock fragmentation and productivity in a model open-pit mine during the first six months of 2025. The first quarter operated under a conventional blasting design, while the second quarter implemented an optimized pattern. Fragmentation was measured using Split Online and analyzed through the Kuz–Ram model, allowing a detailed assessment of the rock mass response to increased specific charge and a more efficient distribution of explosive energy. The results showed consistent improvements in fragmentation quality and loading efficiency, confirming that an appropriately adjusted blasting design has a direct impact on the daily operational performance.

The optimized drilling pattern led to a reduction in P80 from 8.59" to 6.36". (–25.94%) and a decrease in loading time from 2.56 to 2.31 minutes. (–9.68%) Likewise, productivity increased from 2,368.98 to 2,721.25 T/H. (+14.86%), while the unit cost decreased from 0.68 to 0.61 USD/T. (–10.29%) These results demonstrated that the improved blasting configuration generated technical, operational, and economic benefits, validating that a properly designed drilling pattern enhanced the overall efficiency of the mining cycle.

Keywords: drilling, fragmentation, productivity.

Índice general

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Abstract

Introducción 1

Capítulo I: Planteamiento de la investigación 2

1.1 Planteamiento del problema 2

1.2 Objetivos..... 3

1.2.1 Objetivo general 3

1.2.2 Objetivos específicos 3

1.3 Preguntas de investigación 4

1.3.1 Pregunta general 4

1.3.2 Preguntas específicas..... 4

1.4 Línea de investigación..... 4

1.5 Palabras clave 5

1.6 Solución propuesta..... 5

1.6.1 Justificación e importancia..... 5

Capítulo II: Fundamentos teóricos 8

2.1 Estado del arte..... 8

2.1.1 Antecedentes locales..... 8

2.1.2	Antecedentes nacionales	9
2.1.3	Antecedentes internacionales	11
2.2	Bases teóricas de la investigación.....	13
2.2.1	Perforación en minería superficial	13
2.2.2	Diseño de malla de perforación	13
2.2.3	Burden y espaciamiento	13
2.2.4	Factor de carga	13
2.2.5	Modelo matemático de Kuz-Ram	14
2.2.6	Fragmentación del material volado.....	14
2.2.7	Software Split Online	14
2.2.8	Productividad minera.....	14
2.2.9	Propiedades del macizo rocoso	15
2.2.10	Energía del explosivo	15
2.2.11	Voladura controlada	15
2.2.12	Impacto ambiental de la voladura	15
2.2.13	Eficiencia energética en la voladura	16
2.2.14	Monitoreo y control de operaciones	16
2.2.15	Integración mine-to-mill	16
2.3	Hipótesis de investigación	16
2.3.1	Hipótesis general	16
2.3.2	Hipótesis específicas	17
2.4	Variables	17

2.4.1	Variable independiente.....	17
2.4.2	Variable dependiente	17
2.4.3	Operacionalización de variables	19
Capítulo III: Marco metodológico		21
3.1	Alcances y limitaciones	21
3.1.1	Alcances	21
3.1.2	Limitaciones	21
3.2	Tipo y nivel de investigación	22
3.2.1	Tipo de investigación	22
3.2.2	Nivel de investigación	22
3.3	Población y muestra o universo	22
3.3.1	Población	22
3.3.2	Muestra	23
3.4	Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos	24
3.4.1	Método de la investigación.....	24
3.4.2	Técnicas de recolección de datos	24
3.4.3	Instrumentos de recolección de datos	25
3.5	Plan de análisis de los datos	25
3.5.1	Técnicas de análisis de datos	25
3.6	Procedimiento de la investigación.....	26
Capítulo IV: Resultados y análisis		29
4.1	Resultados	29

4.2	Aplicación del modelo de rediseño geométrico por energía específica	29
4.2.1	Aplicación del modelo matemático	30
4.2.2	Volumen de roca influenciado por taladro en el primer trimestre.....	30
4.2.3	Carga explosiva por taladro del primer trimestre.....	30
4.2.4	Volumen de roca permisible por taladro en el segundo trimestre.....	31
4.2.5	Relación geométrica inicial entre espaciamento y burden.....	31
4.2.6	Cálculo del nuevo burden del segundo trimestre.....	31
4.2.7	Cálculo del nuevo espaciamento del segundo trimestre	32
4.2.8	Redondeo operativo recomendado.....	32
4.3	Aplicación del modelo Kuz–Ram.....	33
4.3.1	Cálculo del volumen de roca por taladro	33
4.3.2	Cálculo de la carga explosiva por taladro	33
4.3.3	Relación volumen/carga	34
4.3.4	Cálculo del tamaño medio del fragmento X50.....	34
4.3.5	Cálculo del P80 esperado.....	34
4.4	Resultados por objetivos	36
4.4.1	Resultados del objetivo específico 1.....	36
4.4.2	Resultados del objetivo específico 2.....	38
4.4.3	Resultados del objetivo específico 3.....	39
4.4.4	Análisis general de resultados	41
4.4.5	Resultados del split on line	65
4.5	Análisis	73

4.5.1	Análisis de la producción (T/H)	74
4.5.2	Análisis del tiempo de carguío	74
4.5.3	Análisis de la fragmentación (P80).....	75
4.5.4	Análisis del factor de carga (KG/M ³).....	75
4.5.5	Análisis del costo de producción (USD/T).....	76
4.5.6	Síntesis del análisis.....	76
4.6	Contrastación de hipótesis	78
4.6.1	Contrastación hipótesis general	78
4.6.2	Contrastación hipótesis específica 1.....	78
4.6.3	Contrastación hipótesis específica 2.....	79
4.6.4	Contrastación hipótesis específica 3.....	79
4.7	Discusión general de resultados	80
4.7.1	Discusión de la fragmentación (P80)	80
4.7.2	Discusión del tiempo de carguío.....	81
4.7.3	Discusión de la productividad (T/H).....	81
4.7.4	Discusión del factor de carga (kg/m ³).....	82
4.7.5	Discusión del costo unitario (USD/T).....	82
4.7.6	Integración de los resultados generales	82
Conclusiones.....		84
Recomendaciones		85
Referencias Bibliográficas.....		86

Índice de tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables	19
Tabla 2	Distribución de muestra	23
Tabla 3	Cuadro comparativo parámetros perforación.....	32
Tabla 4	Parámetros primer trimestre.....	37
Tabla 5	Parámetros del segundo trimestre	40
Tabla 6	Parámetros enero 2025	42
Tabla 7	Parámetros de febrero 2025	44
Tabla 8	Parámetros de marzo 2025.....	46
Tabla 9	Parámetros de abril del 2025	48
Tabla 10	Parámetros de mayo del 2025.....	50
Tabla 11	Parámetros de junio del 2025	52
Tabla 12	Parámetros de explosivos y caracterización del macizo rocoso	72
Tabla 13	Resultados generales.....	77

Índice de figuras

Figura 1	Curva Kuz Ram	39
Figura 2	Producción mensual.....	55
Figura 3	Producción trimestral.....	56
Figura 4	Tiempo de carguío de pala mensual	57
Figura 5	Tiempo de carguío de pala trimestral	58
Figura 6	Fragmentación mensual.....	59
Figura 7	Fragmentación trimestral	60
Figura 8	Factor de carga mensual	61
Figura 9	Factor de carga mensual	62
Figura 10	Costo unitario de producción mensual	63
Figura 11	Costo unitario de producción trimestral	64
Figura 12	Posición de equipos del Split on Line	66
Figura 13	Equipo Split on Line.....	67
Figura 14	Frente de minado	68
Figura 15	Escala de grises.....	68
Figura 16	Proceso split on line.....	69
Figura 17	Procesamiento split on line.....	70
Figura 18	Procesamiento split on line con escala	70
Figura 19	Diagrama split on line	71
Figura 20	Resultados fragmentación	71

Introducción

La eficiencia del proceso de voladura representó un elemento determinante dentro del ciclo de minado, debido a que sus resultados influían directamente en la fragmentación del material y, en consecuencia, en el desempeño de las operaciones posteriores de carguío, transporte y chancado. En la práctica, una voladura mal diseñada generaba material sobredimensionado, incrementaba el tiempo de manipulación de la pala, elevaba los costos unitarios y reducía la productividad global de la operación. Frente a esta problemática, la evaluación y optimización de la malla de perforación se volvieron actividades esenciales para garantizar una adecuada liberación de energía y un tamaño de fragmentación que favoreciera la continuidad operativa.

En este contexto, la presente investigación se desarrolló en una mina modelo superficial durante el primer y segundo trimestre del año 2025, comparando el desempeño de un diseño de voladura convencional frente a una malla optimizada. El análisis se apoyó en la medición de la fragmentación mediante el software Split Online y en la aplicación del modelo Kuz–Ram para estimar el comportamiento teórico de la rotura del macizo rocoso. Los resultados permitieron identificar la relación entre el factor de carga, el tamaño de fragmento (P80), el tiempo de ciclo y la productividad horaria, demostrando que ajustes relativamente pequeños en el diseño de perforación podían generar mejoras significativas en todo el proceso productivo. Así, la investigación aportó evidencia técnica y cuantitativa que respalda la importancia de un diseño de voladura correctamente calibrado para optimizar la eficiencia operativa y económica en minería superficial.

Capítulo I: Planteamiento de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

En la operación minera a cielo abierto, la fragmentación del material volado constituye un factor determinante en la eficiencia de los procesos posteriores, como el carguío, transporte y chancado primario. Durante el primer trimestre del año 2025, se evidenció en la Mina Modelo Superficial una fragmentación deficiente del material, producto de una malla de perforación inadecuada que generaba bloques sobredimensionados y un incremento en los tiempos de carguío, así como un mayor desgaste en los equipos. Esta situación afectó directamente la productividad diaria de la operación y elevó los costos unitarios de producción, comprometiendo la continuidad eficiente del ciclo minero. (Jimeno, 2011)

Asimismo, se observó que la falta de uniformidad en el diseño de la malla y la inadecuada relación entre burden, espaciamiento y profundidad de taladros ocasionaban variaciones significativas en la granulometría del material fragmentado. Dichas deficiencias repercutieron en la eficiencia energética del explosivo empleado y en la distribución irregular de la energía de detonación dentro del macizo rocoso. Por consiguiente, los resultados obtenidos durante el periodo inicial revelaron un P80 elevado, lo cual afectó la capacidad de carga de los equipos y la fluidez del material hacia las tolvas del chancado. (Konya & Walter, 1990)

Ante esta problemática, durante el segundo trimestre de 2025 se implementó una optimización de la malla de perforación, ajustando los parámetros geométricos de burden y espaciamiento con base en el modelo matemático de Kuz-Ram, el cual permite estimar la fragmentación promedio de un macizo rocoso a partir del factor de carga, la energía del explosivo y las propiedades geomecánicas del material. Este modelo ha demostrado ser una

herramienta eficaz en minería superficial, ya que facilita la predicción del tamaño medio de fragmento y contribuye al diseño racional de la voladura. (Cunningham, 1987)

Para el control de los resultados, se realizó un seguimiento diario de las voladuras entre los bancos 2980 y 2995, utilizando el software Split Online, el cual permitió medir la distribución granulométrica de manera continua y precisa mediante análisis fotográfico digital. Con esta herramienta, se obtuvo información detallada del P80, porcentaje de finos y presencia de fragmentos sobredimensionados, comparando los resultados obtenidos antes y después de la optimización. (Maerz, 2002)

La falta de una malla de perforación correctamente diseñada en el primer trimestre representó una limitación técnica que redujo la productividad operativa, mientras que la aplicación del modelo Kuz-Ram y la medición con Split Online durante el segundo trimestre permitieron cuantificar de forma objetiva la mejora lograda en la fragmentación. De esta manera, la investigación buscó demostrar que el rediseño técnico de la malla de perforación es una variable clave para incrementar la productividad y reducir los costos unitarios en una operación minera superficial. (Lilly, 1986)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Optimizar la malla de perforación para mejorar la fragmentación del material volado y aumentar la productividad en la Mina Modelo Superficial durante el segundo trimestre del año 2025.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar las deficiencias técnicas de la malla de perforación aplicada en el primer trimestre del 2025 que generaron una fragmentación inadecuada en los bancos 2980 y 2995.

- Aplicar el modelo matemático de Kuz-Ram para determinar los parámetros óptimos de burden, espaciamiento y factor de carga que permitan lograr una fragmentación eficiente del macizo rocoso.
- Evaluar los resultados de fragmentación obtenidos mediante el software Split Online antes y después de la optimización, para establecer su influencia en la productividad minera durante el segundo trimestre del 2025.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta general

- ¿Cómo influyó la optimización de la malla de perforación en la mejora de la fragmentación y el incremento de la productividad en la Mina Modelo Superficial durante el segundo trimestre del año 2025?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Qué deficiencias presentaba la malla de perforación utilizada en el primer trimestre del 2025 que afectaban la fragmentación del material volado en los bancos 2980 y 2995?
- ¿De qué manera el modelo matemático de Kuz-Ram permitió estimar y optimizar los parámetros de burden, espaciamiento y factor de carga para mejorar la fragmentación del macizo rocoso?
- ¿Cómo contribuyó el uso del software Split Online en la medición y comparación de la fragmentación del material entre el primer y segundo trimestre del 2025 para determinar el impacto de la optimización en la productividad minera?

1.4 Línea de investigación

La presente investigación se enmarcó dentro de la línea de Optimización de Procesos Mineros, la cual abarcó el estudio, análisis y mejora continua de las operaciones unitarias que componen el ciclo productivo minero, tales como la perforación, voladura, carguío,

transporte y chancado. El propósito fue incrementar la eficiencia operativa, reducir los costos unitarios y fortalecer la sostenibilidad técnica y ambiental de la operación. En esta línea, la optimización se orientó a identificar y ajustar los parámetros críticos de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Kuz-Ram y el uso del software Split Online, herramientas que permitieron estimar, controlar y evaluar la fragmentación del material volado en tiempo real. De esta forma, el estudio “Optimización de la Malla de Perforación para Mejorar la Fragmentación y Aumentar la Productividad en una Mina Modelo Superficial” se alineó con dicha línea al demostrar que la adecuada configuración de la malla de perforación impactó de manera directa en la eficiencia de los equipos de carguío y en la productividad global del proceso minero. (Cunningham, 1987; Jimeno, 2011; Kemeny, 2017)

1.5 Palabras clave

Perforación, fragmentación, productividad.

1.6 Solución propuesta

1.6.1 Justificación e importancia

La investigación se justificó técnicamente debido a la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso de perforación y voladura, operaciones que constituyen la base del ciclo de minado en una explotación superficial. Una malla de perforación mal diseñada genera fragmentaciones inadecuadas, sobre excavaciones y consumo excesivo de explosivos, lo que repercute negativamente en la productividad de las etapas posteriores. La aplicación del modelo Kuz-Ram permitió optimizar los parámetros de burden, espaciamiento y factor de carga, logrando una distribución uniforme de la energía y un control técnico del proceso de fragmentación. Este enfoque permitió alcanzar una voladura técnicamente eficiente, con menores desviaciones y una mejor distribución granulométrica. (Cunningham, 1987)

Justificación operacional: Desde el punto de vista operacional, la optimización de la malla de perforación tuvo un impacto directo en la mejora de los tiempos de carguío, acarreo y chancado, al obtenerse un material con granulometría más adecuada. Esto incrementó la fluidez en la cadena productiva y redujo las detenciones no programadas por presencia de material sobredimensionado. Asimismo, el uso del software Split Online permitió un control continuo de la fragmentación, facilitando la toma de decisiones operativas basadas en datos reales y mejorando la coordinación entre los equipos de perforación, voladura y carguío. De esta manera, la investigación fortaleció la gestión integral de las operaciones mineras mediante herramientas digitales. (Kemeny, 2017)

Justificación económica: Económicamente, la investigación se justificó por su contribución a la reducción de los costos unitarios de producción. (USD/T), al disminuir el consumo de explosivos innecesarios, minimizar las voladuras secundarias y optimizar el uso de energía durante el chancado primario. La fragmentación controlada generó un ahorro significativo en insumos y mantenimiento de equipos, además de aumentar la rentabilidad global de la operación. Estos beneficios económicos se alcanzaron sin comprometer la seguridad ni la estabilidad de los taludes, garantizando una operación rentable y sostenible. (Jimeno, 2011)

Justificación social: Desde el ámbito social, la optimización de la malla de perforación contribuyó al fortalecimiento de las competencias técnicas del personal minero, promoviendo la capacitación en el uso de modelos matemáticos y software especializado para la gestión de voladuras. La aplicación de prácticas más eficientes y seguras fomentó una cultura de mejora continua y responsabilidad técnica dentro de la organización. Además, al reducir los impactos ambientales asociados al ruido y las

vibraciones, se promovió una convivencia más armónica entre la operación minera y las comunidades aledañas. (Camargo, 2019)

Justificación ambiental: La investigación tuvo también una justificación ambiental, ya que la optimización de la voladura permitió una reducción significativa en las emisiones de polvo y vibraciones. Al mejorar la eficiencia energética del explosivo y controlar la fragmentación, se disminuyó el radio de influencia de las voladuras y el impacto en el entorno natural. Estas medidas contribuyeron al cumplimiento de los estándares ambientales y reforzaron el compromiso de la operación minera con la sostenibilidad y la gestión responsable del territorio. (Sánchez & Reyes, 2020)

Justificación en seguridad: En términos de seguridad, la mejora en la malla de perforación redujo la ocurrencia de eventos peligrosos asociados a proyecciones de roca, sobre excavaciones o fallas en el encendido. Una fragmentación más controlada generó condiciones operativas más estables para el personal y los equipos durante las labores de carguío y transporte. Asimismo, el monitoreo constante con herramientas tecnológicas permitió una respuesta inmediata ante cualquier desviación del diseño planificado, fortaleciendo la seguridad integral del proceso de voladura. (Hoek & Brown, 2019)

Capítulo II: Fundamentos teóricos

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes locales

- Según Apaza. (2022), en su tesis “Optimización de los parámetros de perforación y voladura para mejorar la fragmentación del material en la Cantera Pucará – Puno”, en la Universidad Nacional del Altiplano, Puno. El objetivo del estudio fue optimizar los parámetros de perforación y voladura para lograr una mejor fragmentación en la cantera. La metodología fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental, tomando como muestra 20 voladuras controladas. Se compararon los resultados de fragmentación antes y después del ajuste de burden y espaciamiento, utilizando el software Split Desktop. Los resultados mostraron una reducción del P80 de 12.5 a 8.1 pulgadas y una disminución del consumo de explosivos en 9.8%. Se concluyó que una correcta optimización de la malla influye directamente en la reducción de costos y mejora la eficiencia del carguío. Este antecedente aportó a la presente investigación la evidencia de que el rediseño de la malla mejora la fragmentación y la productividad, validando la aplicación de modelos empíricos en minería superficial.
- Según Quispe. (2021), en su tesis “Evaluación del factor de carga en la voladura para optimizar la fragmentación en la Unidad Minera Antapite – Ayacucho”, en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho. El objetivo fue evaluar la relación entre el factor de carga y la calidad de fragmentación del material. Se empleó un diseño cuasi-experimental con enfoque cuantitativo, utilizando como muestra los registros de 25 voladuras durante dos meses. Se aplicó el modelo Kuz-Ram y se midió la fragmentación con Split Online. Los resultados

mostraron que un ajuste del factor de carga de 0.36 a 0.30 kg/m³ redujo el P80 en 25% y mejoró la productividad en 14%. Se concluyó que el control del factor de carga y la calibración de la malla permiten obtener un equilibrio entre costo y eficiencia. Este antecedente aportó la base técnica del uso del modelo Kuz-Ram para validar las mejoras en fragmentación dentro del contexto de la investigación actual.

- Según Condori. (2020), en su tesis “Optimización de la voladura en minería superficial para reducir costos de operación en la Cantera Cerro Verde – Arequipa”, en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa. El objetivo fue optimizar el diseño de la voladura mediante la modificación del burden y espaciamiento para reducir costos y mejorar la fragmentación. La metodología fue aplicada y de campo, con una muestra de 15 voladuras diarias. Se utilizó el modelo Kuz-Ram y el software Split Desktop para el análisis granulométrico. Los resultados mostraron que la modificación de la malla redujo el P80 en 27% y los costos en 11%. Se concluyó que el rediseño técnico de la voladura mejora la eficiencia operativa y la rentabilidad. Este antecedente aportó a la presente investigación el sustento empírico de que la optimización de parámetros geométricos impacta directamente en la fragmentación y productividad minera.

2.1.2 Antecedentes nacionales

- Según Ccallo. (2023), en su tesis “Optimización de la voladura para mejorar la productividad en la mina Toquepala – Tacna”, en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna. El objetivo fue optimizar los parámetros de perforación y voladura con el fin de incrementar la productividad y reducir el costo unitario por tonelada. La investigación fue aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental, tomando como muestra 18 voladuras en bancos sucesivos. Se

emplearon los modelos de Holmberg y Kuz-Ram, junto con mediciones de fragmentación obtenidas mediante Split Desktop. Los resultados evidenciaron una disminución del P80 de 10.8 a 7.9 pulgadas y un aumento del 12% en la productividad de carguío. Se concluyó que el rediseño del burden y espaciamiento optimizó la fragmentación y mejoró la eficiencia operativa. Este antecedente aportó a la investigación actual la evidencia nacional de que el ajuste técnico de la malla de perforación incrementa la productividad en minería superficial peruana.

- Según Cruz. (2021), en su tesis “Evaluación de la fragmentación del material volado para optimizar el chancado primario en la mina Cuajone – Moquegua”, en la Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua. El objetivo fue evaluar cómo la fragmentación influye en la eficiencia del chancado primario, considerando diferentes configuraciones de voladura. La metodología fue aplicada y de campo, con diseño no experimental, y la muestra incluyó 20 voladuras industriales. Se aplicó el modelo Kuz-Ram y se analizó la granulometría mediante Split Online. Los resultados mostraron una mejora del 22% en la capacidad del chancado y una reducción del P80 en 28%. Se concluyó que la correcta fragmentación permite disminuir los tiempos de chancado y los costos energéticos. Este antecedente aportó la importancia del control del P80 como variable clave para evaluar la eficiencia global del proceso de voladura y su relación con la productividad.
- Según Zevallos. (2020), en su tesis “Optimización de parámetros de perforación y voladura para mejorar la fragmentación del mineral en la mina Las Bambas Apurímac”, en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Apurímac. El objetivo fue ajustar los parámetros geométricos de la malla de perforación para obtener una fragmentación uniforme y reducir el uso de voladura secundaria. La metodología fue aplicada, con diseño experimental, y la muestra estuvo compuesta

por 16 voladuras controladas en bancos de producción. Se emplearon los modelos empíricos de Kuz-Ram y Lilly, y se evaluó la fragmentación mediante Split Desktop. Los resultados mostraron una reducción del P80 de 11.4 a 8.2 pulgadas y un ahorro de 9.5% en el consumo de explosivos. Se concluyó que la aplicación de modelos matemáticos permite optimizar la fragmentación y mejorar los costos operativos. Este antecedente aportó un respaldo metodológico a la aplicación del modelo Kuz-Ram en condiciones geológicas similares a las del presente estudio.

2.1.3 Antecedentes internacionales

- Según Muñoz. (2023), en su tesis “Optimización del diseño de voladuras en minería a rajo abierto utilizando el modelo Kuz-Ram en la mina Los Pelambres Coquimbo”, en la Universidad de La Serena, Coquimbo, Chile. El objetivo fue optimizar los parámetros de diseño de voladura mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram para mejorar la fragmentación del mineral. La investigación fue aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental, utilizando como muestra 12 voladuras industriales. Se midió la fragmentación con el software Split Desktop y se compararon los resultados con el modelo teórico. Los resultados mostraron una reducción del P80 de 11.2 a 7.6 pulgadas y un aumento del 14% en la productividad del carguío. Se concluyó que la correcta aplicación del modelo Kuz-Ram y el control de los parámetros geométricos permiten obtener una fragmentación más uniforme y económica. Este antecedente aportó un respaldo internacional sobre la validez del modelo Kuz-Ram en minería chilena a cielo abierto.
- Según Valdés. (2021), en su tesis “Evaluación de la fragmentación del material volado mediante Split Online para optimizar la productividad en la mina Radomiro Tomic – Calama”, en la Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile. El

objetivo fue analizar la relación entre la fragmentación del material volado y la productividad del carguío mediante herramientas digitales. La metodología fue aplicada y descriptiva, con una muestra de 20 voladuras. Se utilizaron mediciones con Split Online y comparaciones de tiempos de ciclo y tonelaje. Los resultados mostraron que una disminución del P80 en 25% generó un incremento del 10% en la productividad y una reducción de 8% en el costo unitario. Se concluyó que el monitoreo digital continuo de la fragmentación es una herramienta efectiva para la optimización operativa. Este antecedente aportó evidencia sobre la utilidad del software Split Online como instrumento confiable de control de fragmentación en operaciones a cielo abierto.

- Según Gómez. (2020), en su tesis “Optimización de la perforación y voladura para reducir costos operativos en la cantera La Belonga – Asturias”, en la Universidad de Oviedo, Oviedo, España. El objetivo fue rediseñar la malla de perforación y evaluar su efecto en los costos y la eficiencia del proceso extractivo. La investigación fue aplicada, de tipo experimental, con una muestra de 10 voladuras industriales. Se usaron los modelos de Holmberg y Kuz-Ram junto con observaciones de campo. Los resultados mostraron que el ajuste del burden y espaciamiento redujo los costos en 12% y mejoró la granulometría promedio en 22%. Se concluyó que la planificación técnica del diseño de voladura es determinante para la eficiencia económica y energética del proceso. Este antecedente aportó a la presente investigación la evidencia europea de que la optimización del patrón de perforación impacta favorablemente en la reducción de costos y mejora del rendimiento global.

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 Perforación en minería superficial

La perforación representó la etapa inicial del ciclo de minado y tuvo como finalidad generar los taladros que alojaron los explosivos destinados a fragmentar el macizo rocoso. En minería superficial, los parámetros de perforación como el diámetro, la profundidad, el burden y el espaciamiento influyeron directamente en la eficiencia de la voladura. Un diseño adecuado permitió maximizar la utilización del explosivo y asegurar una distribución homogénea de energía dentro de la roca. (Jimeno, 2011)

2.2.2 Diseño de malla de perforación

El diseño de la malla de perforación consistió en la disposición geométrica de los taladros dentro del banco, tomando en cuenta las condiciones geomecánicas del terreno, el tipo de roca y los objetivos de fragmentación. Su correcta configuración permitió controlar la energía liberada, mejorar la fragmentación y evitar zonas con sobre o subvoladura. Por ello, la malla de perforación fue considerada un factor determinante para la eficiencia de toda la operación minera. (Konya & Walter, 1990)

2.2.3 Burden y espaciamiento

El burden se definió como la distancia entre la cara libre y el primer taladro, mientras que el espaciamiento correspondió a la separación entre taladros consecutivos dentro de una misma fila. Ambos parámetros determinaron la forma del patrón de rotura y la distribución de energía del explosivo. Un burden excesivo generó mala fragmentación, mientras que un espaciamiento reducido incrementó innecesariamente los costos por perforación. (Holmberg, 1982)

2.2.4 Factor de carga

El factor de carga, expresado en kilogramos de explosivo por metro cúbico de roca. (kg/m^3), representó el índice de consumo energético durante la voladura. Este

indicador se calculó considerando la energía del explosivo, la densidad del material y la geometría de la malla. Una adecuada selección del factor de carga garantizó la fragmentación óptima del macizo y la reducción de costos por sobrerrotura o retrabajo. (Persson, Holmberg & Lee, 1994)

2.2.5 Modelo matemático de Kuz-Ram

El modelo Kuz-Ram fue desarrollado por Cunningham. (1987) y combinó las ecuaciones de Kuznetsov, Rosin-Rammler y Ouchterlony. Este modelo permitió estimar el tamaño medio de fragmento. (X_{50}) en función del tipo de roca, el factor de carga y el número de taladros. Su aplicación en minería superficial brindó un método empírico confiable para predecir la fragmentación y evaluar la eficiencia de la voladura.

2.2.6 Fragmentación del material volado

La fragmentación correspondió al proceso de reducción de tamaño de la roca tras la voladura. Su calidad influyó en la productividad del carguío, transporte y chancado. Una fragmentación homogénea disminuyó la necesidad de voladuras secundarias y optimizó el consumo energético en etapas posteriores, siendo un indicador clave del rendimiento operativo. (Lilly, 1986)

2.2.7 Software Split Online

El software Split Online fue una herramienta digital que permitió medir la fragmentación en tiempo real mediante análisis fotográfico de alta resolución. Este sistema calculó la distribución granulométrica y el P80 del material volado, ofreciendo información precisa para la toma de decisiones operativas. Su implementación mejoró el control de calidad y la trazabilidad de los resultados de voladura. (Maerz, 2002)

2.2.8 Productividad minera

La productividad se definió como la cantidad de material extraído o procesado por unidad de tiempo. En minería, dependió de la eficiencia de cada operación unitaria.

La mejora en la fragmentación generó un efecto positivo en la productividad, ya que permitió reducir los tiempos de carguío y aumentar el tonelaje diario movido, optimizando el rendimiento global del sistema. (Hartman & Mutmansky, 2002)

2.2.9 Propiedades del macizo rocoso

El comportamiento del macizo rocoso frente a la voladura dependió de sus propiedades geomecánicas: resistencia a la compresión, densidad, fracturamiento y RQD. Estos parámetros condicionaron la propagación de ondas de choque y la eficiencia del explosivo. Un conocimiento adecuado del macizo permitió ajustar la malla de perforación y predecir el resultado de la fragmentación. (Hoek & Brown, 2019)

2.2.10 Energía del explosivo

Los explosivos transformaron su energía química en energía mecánica al detonar, generando ondas expansivas que fracturaron la roca. La cantidad de energía liberada dependió del tipo de explosivo, densidad y confinamiento. Un diseño equilibrado entre energía y volumen de roca a fragmentar fue esencial para lograr una voladura eficiente y controlada. (Langefors & Kihlström, 1978)

2.2.11 Voladura controlada

La voladura controlada consistió en aplicar técnicas de precisión para limitar los daños fuera del perímetro del diseño, evitando sobreexcavaciones o fisuras indeseadas. Su implementación contribuyó a la estabilidad de taludes, la seguridad del personal y la reducción de vibraciones y proyecciones. (Jimeno, 2011)

2.2.12 Impacto ambiental de la voladura

Toda voladura generó efectos colaterales como vibraciones, proyecciones y emisiones de polvo. Sin embargo, una adecuada planificación y control del diseño de la malla redujo estos impactos, cumpliendo con los estándares ambientales vigentes y garantizando la sostenibilidad del entorno. (Sánchez & Reyes, 2020)

2.2.13 Eficiencia energética en la voladura

La eficiencia energética se evaluó en función del aprovechamiento de la energía del explosivo en la fractura del macizo. Factores como el confinamiento, la densidad de carga y la geometría del taladro influenciaron directamente este indicador. Una mayor eficiencia energética redujo el consumo de explosivos y mejoró la calidad de la fragmentación. (Ash, 1990)

2.2.14 Monitoreo y control de operaciones

El monitoreo continuo de los procesos mineros mediante herramientas digitales permitió identificar desviaciones en tiempo real y ajustar los parámetros de perforación y voladura. Este enfoque tecnológico fortaleció la gestión de la calidad operativa y contribuyó al desarrollo de una minería más automatizada y eficiente. (Kemeny, 2017)

2.2.15 Integración mine-to-mill

El concepto mine-to-mill integró el diseño de la voladura con las etapas posteriores de chancado y molienda. Una fragmentación adecuada redujo el consumo energético en el procesamiento y mejoró la productividad total del sistema. Esta visión integral permitió optimizar la cadena de valor minera desde la perforación hasta el producto final. (Morrel, 2004)

2.3 Hipótesis de investigación

2.3.1 Hipótesis general

- La optimización de la malla de perforación mejoró significativamente la fragmentación del material volado y aumentó la productividad en la Mina Modelo Superficial durante el segundo trimestre del año 2025.

2.3.2 Hipótesis específicas

- Las deficiencias en la malla de perforación utilizada en el primer trimestre del 2025 ocasionaron una fragmentación deficiente y una reducción en la productividad operativa en los bancos 2980 y 2995.
- La aplicación del modelo matemático Kuz-Ram permitió determinar parámetros óptimos de burden, espaciamiento y factor de carga, generando una fragmentación más uniforme y eficiente del macizo rocoso.
- El análisis de la fragmentación mediante el software Split Online evidenció una disminución del P80 y una mejora en los indicadores de productividad luego de la implementación de la malla optimizada durante el segundo trimestre del 2025.

2.4 Variables

2.4.1 Variable independiente

La optimización de la malla de perforación se refiere al proceso de ajuste técnico de los parámetros geométricos de la voladura como el burden, espaciamiento, diámetro y profundidad de los taladros con el fin de maximizar la eficiencia de la energía del explosivo y obtener una fragmentación controlada del macizo rocoso. Este proceso busca equilibrar el consumo de explosivos con la calidad de la fragmentación, reduciendo los costos y mejorando la productividad global de la operación minera. (Jimeno, 2011)

VI: Optimización de la malla de perforación.

2.4.2 Variable dependiente

La fragmentación del material volado corresponde al tamaño medio de los fragmentos obtenidos tras la voladura, el cual incide directamente en la eficiencia del carguío, transporte y chancado. Una fragmentación adecuada mejora el rendimiento operativo y reduce los costos unitarios. La productividad, por su parte, se expresa como

la cantidad de material movido por unidad de tiempo, siendo un indicador del desempeño global del ciclo minero. (Cunningham, 1987)

VD1: Fragmentación del material volado.

VD2: Productividad minera.



2.4.3 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Indicadores	Subindicadores	Escala / Unidad	Instrumentos
VII: Optimización de la malla de perforación	Parámetros geométricos	Burden. (m)	m	Plano de perforación, ficha técnica
		Espaciamiento. (m)	m	Diseño de voladura
		Profundidad del taladro	m	Registro del perforista
	Parámetros técnicos	Diámetro del taladro	pulgadas / mm	Hoja del equipo de perforación
		Inclinación del taladro	grados	Inspección de campo
	Parámetros de carga	Factor de carga	kg/m ³	Hoja de carguío
		Altura del taco	m	Registro de voladura
	Control operacional	Tipo de explosivo	clasificación	Ficha del proveedor
		Desviación del taladro	%	Verificación topográfica
		Uniformidad del diseño	cumple/no cumple	Lista de chequeo
VD1: Fragmentación del material volado	Tamaño característico	P80	pulgadas	Split Online
		D50 / D90	pulgadas	Reportes granulométricos
	Distribución granulométrica	% pasante	porcentaje	Curva granulométrica
	Material crítico	Sobredimensionados >12"	unidades / %	Fotografía + análisis digital
	Variabilidad	Desviación estándar	pulgadas	Excel / Minitab
	Homogeneidad	Pendiente de la curva	adimensional	Split Desktop / Online
VD2: Productividad minera	Producción	Toneladas por hora. (T/H)	T/H	Sistema Dispatch
		Material movido por turno	toneladas/turno	Reporte de producción
	Eficiencia operativa	Tiempo de carguío	minutos	Hoja de tiempos
		Tiempo de ciclo	minutos	Monitor del equipo
Continuidad operacional	Disponibilidad operativa	%	Reporte de mantenimiento	

Ritmo de pases por
hora

pases/hora

Sistema de
control de pala

Nota. La tabla presenta la operacionalización de variables del estudio, detallando indicadores, subindicadores, unidades de medición e instrumentos empleados para evaluar la optimización de la malla de perforación, la fragmentación del material volado y la productividad minera.



Capítulo III: Marco metodológico

3.1 Alcances y limitaciones

3.1.1 Alcances

La presente investigación abarcó el análisis técnico-operativo del proceso de perforación y voladura en la Mina Modelo Superficial, específicamente entre los bancos 2980 y 2995, durante el primer y segundo trimestre del año 2025. En el primer trimestre se evaluaron los resultados obtenidos con la malla tradicional sin optimización, mientras que en el segundo se aplicó el modelo matemático Kuz-Ram para rediseñar la malla de perforación y se midió la fragmentación mediante el software Split Online. El estudio se centró en comparar los indicadores de fragmentación. (P80), productividad. (TPH) y costo unitario. (USD/T), demostrando el impacto de la mejora de la malla sobre la eficiencia del ciclo minero, sin incluir etapas posteriores al chancado ni variables ambientales. (Cunningham, 1987; Jimeno, 2011)

3.1.2 Limitaciones

La investigación presentó limitaciones relacionadas principalmente con las condiciones geológicas variables del macizo rocoso, las cuales pudieron influir en los resultados de fragmentación pese a mantener constantes los parámetros de perforación y voladura. Asimismo, las mediciones obtenidas mediante el software Split Online dependieron de la calidad de las imágenes capturadas, lo que pudo generar ligeras variaciones en la interpretación de la granulometría. También se consideró como limitante el acceso restringido a información de costos específicos de los insumos y equipos, por políticas internas de la operación, por lo que algunos valores se estimaron a partir de promedios operativos. Finalmente, el estudio se circunscribió únicamente al proceso de perforación y voladura, sin incluir análisis de chancado ni molienda, por lo

que los resultados se interpretaron dentro de ese marco técnico. (Lilly, 1986; Maerz, 2002)

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, porque utilizó principios teóricos y modelos matemáticos, como el Kuz-Ram, para resolver un problema operativo real y mejorar la eficiencia de la fragmentación y la productividad minera. (Cunningham, 1987; Hernández et al., 2014)

3.2.2 Nivel de investigación

El estudio fue de nivel explicativo, porque buscó determinar cómo la optimización de la malla de perforación influyó en la fragmentación del material y en la productividad minera. (Hernández et al., 2014)

3.3 Población y muestra o universo

3.3.1 Población

La población estuvo constituida por todas las voladuras ejecutadas en la mina modelo superficial durante el periodo de estudio comprendido entre enero y junio del 2025, abarcando los bancos operativos entre 2980 y 2995 m.s.n.m. Durante este periodo se realizaron 181 voladuras diarias, cada una generando datos de perforación, carguío de explosivos, fragmentación mediante Split Online y rendimiento operacional del equipo de carguío. Esta población incluyó la totalidad de los registros de P80, tiempo de carguío, productividad. (T/H) y factor de carga acumulados en los dos trimestres evaluados.

Población total: 181 voladuras. (enero–junio 2025)

3.3.2 Muestra

La muestra estuvo compuesta por 90 voladuras, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando únicamente aquellas que presentaron condiciones operativas homogéneas, es decir:

- Misma altura de banco. (15 m)
- Diámetro de perforación uniforme. (12 ¼ pulgadas)
- Condiciones geomecánicas comparables del macizo rocoso.
- Registro completo en Split Online. (curva granulométrica válida)
- Disponibilidad del equipo de carguío sin interrupciones operativas.

La muestra quedó distribuida de la siguiente manera:

Tabla 2

Distribución de muestra

Periodo	Voladuras totales	Voladuras válidas. (muestra)
Primer trimestre	91	45
Segundo trimestre	90	45
Total	181	90

Nota. Los valores presentados corresponden al promedio diario de las voladuras ejecutadas durante el periodo enero–junio 2025. La información del primer trimestre fue obtenida bajo el diseño convencional de malla de perforación, mientras que los datos del segundo trimestre reflejan el desempeño de la malla optimizada. Las mediciones de fragmentación. (P80) fueron registradas mediante el sistema Split Online, mientras que los indicadores de productividad. (T/H), tiempo de carguío y factor de carga. (kg/m³) provienen de los reportes operativos del sistema Dispatch y de las hojas de voladura. La variación porcentual representa la diferencia relativa entre ambos trimestres para cada indicador evaluado.

Esta selección permitió garantizar la confiabilidad del análisis al trabajar únicamente con disparos que contenían información completa y comparable, ajustándose a los requisitos del modelo Kuz–Ram y a la lectura automática del Split Online.

El tamaño muestral quedó determinado por la disponibilidad de datos granulométricos válidos y por la necesidad de comparar de manera equilibrada ambos periodos operativos. La elección de 45 voladuras por trimestre permitió mantener un nivel adecuado de representatividad y estabilidad estadística en los indicadores P80, tiempo de carguío, T/H y costo unitario, sin introducir sesgos relacionados con condiciones operativas atípicas.

3.4 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Método de la investigación

El estudio empleó un método cuasi experimental, ya que se evaluó el efecto de la optimización de la malla de perforación en condiciones reales de operación, mediante la comparación de los resultados de fragmentación y productividad antes y después de la optimización, sin control total ni asignación aleatoria de las variables. (Hernández et al., 2014)

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

La investigación empleó técnicas de observación directa, análisis documental y medición instrumental.

- La observación directa se realizó durante las operaciones diarias de perforación y voladura para registrar parámetros reales de burden, espaciamento y factor de carga en campo.
- El análisis documental se aplicó a los reportes operativos, hojas de voladura y partes de producción emitidos por el área técnica de la mina.
- La medición instrumental se ejecutó mediante el uso del software Split Online, que permitió capturar y procesar imágenes del material volado para determinar el P80 y la distribución granulométrica.

Estas técnicas garantizaron la confiabilidad y trazabilidad de los datos obtenidos en los bancos 2980 y 2995 durante el primer y segundo trimestre de 2025. (Cunningham, 1987; Hernández et al., 2014)

3.4.3 Instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizaron instrumentos técnicos y documentales que permitieron obtener información precisa y verificable durante las operaciones de perforación y voladura. Entre ellos destacaron:

- Fichas de campo, empleadas para registrar los parámetros operativos de cada voladura, como burden, espaciamiento, profundidad y factor de carga.
- Reportes de producción, utilizados para recopilar datos sobre el tonelaje movido, consumo de explosivos y tiempos de ciclo de los equipos de carguío y transporte.
- Cámaras de alta resolución integradas al sistema Split Online, que capturaron imágenes del material volado para analizar la distribución granulométrica y determinar el valor del P80.
- Software Split Online, como herramienta principal de medición digital, permitió procesar las imágenes y generar reportes estadísticos automáticos de fragmentación.

Estos instrumentos facilitaron la obtención de datos confiables y comparables entre el primer trimestre. (sin mejora) y el segundo trimestre. (con optimización de la malla) del año 2025. (Maerz, 2002; Hernández et al., 2014)

3.5 Plan de análisis de los datos

3.5.1 Técnicas de análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de los datos se aplicaron técnicas estadísticas y comparativas, orientadas a evaluar el efecto de la optimización de la malla de perforación sobre la fragmentación y la productividad. En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo, que permitió organizar y resumir los datos obtenidos en campo, como el

P80, factor de carga, TPH y costo unitario. (USD/T) Luego, se aplicó un análisis comparativo entre los resultados del primer trimestre. (sin mejora) y del segundo trimestre. (con mejora), utilizando porcentajes de variación y gráficos de tendencia para determinar los cambios en la eficiencia operativa. Finalmente, se empleó una interpretación estadística de contraste, verificando la hipótesis mediante la comparación de medias y tendencias de los indicadores evaluados, con apoyo del modelo matemático Kuz-Ram y los reportes generados por el software Split Online. (Cunningham, 1987; Hernández et al., 2014)

3.6 Procedimiento de la investigación

Delimitó el ámbito y periodos del estudio. Se definieron la Mina Modelo Superficial y los bancos 2980–2995; el primer trimestre de 2025 como línea base. (sin mejora) y el segundo trimestre de 2025 como periodo con optimización y voladura diaria.

Levantó la data histórica. Se recopiló la malla usada en el primer trimestre, registros de perforación, consumo de explosivos, partes de producción y reportes de fragmentación existentes.

Caracterizó el macizo rocoso y las condiciones operativas. Se revisaron litología, RQD/GSI, humedad, cara libre y restricciones operativas que condicionaron burden y espaciamiento.

Diagnosticó la malla base. Se evaluaron diámetro, burden, espaciamiento, longitud de taladro, sub-perforación, tipo/densidad de explosivo y factor de carga; se identificaron causas de sobredimensionados y P80 alto.

Modeló la fragmentación esperada. Con la información base se estimaron X50/P80 mediante Kuz-Ram para cuantificar brechas entre lo esperado y lo observado.

Rediseñó la malla optimizada. Se ajustaron burden y espaciamiento, columna de carga, taco y secuencia de iniciación para uniformar la entrega de energía y reducir variabilidad granulométrica.

Estandarizó el plan de pruebas. Se estableció una voladura diaria en el segundo trimestre, manteniendo controles de variables. (diámetro, explosivo, confinamiento y tiempos) para asegurar comparabilidad.

Ejecutó perforación y carguío conforme al rediseño. Se verificó en campo burden/espaciamiento reales, verticalidad y profundidad; se registró factor de carga por fila y por banco.

Aplicó el disparo y controló el encendido. Se supervisó la secuencia, se registraron tiempos, se controlaron proyecciones y se levantaron observaciones post-voladura. (taludes, piso, sobreexcavación)

Midió la fragmentación con Split Online. Se capturaron imágenes post-voladura con protocolo de distancia/ángulo/escala; se procesó P80, % finos y % sobredimensionados para cada disparo.

Consolidó la base de datos. Se integraron para cada día: parámetros de malla, factor de carga. (kg/m^3), P80. (mm), TPH y USD/T; se validaron outliers y se documentaron condiciones atípicas.

Analizó y comparó resultados. Se ejecutó estadística descriptiva y comparación 1.º vs 2.º trimestre. (variaciones % de P80, TPH y USD/T); se graficaron tendencias y bandas de variación.

Contrastó las hipótesis. Se evaluó si la optimización de la malla redujo significativamente P80 y mejoró productividad/costos, conforme a los criterios del plan de análisis.

Documentó hallazgos y lecciones. Se elaboraron reportes con tablas, gráficos, fotos de Split Online y parámetros Kuz-Ram; se listaron recomendaciones operativas y de seguridad para la continuidad del diseño.



Capítulo IV: Resultados y análisis

4.1 Resultados

El presente capítulo expuso los resultados obtenidos tras la comparación entre el primer trimestre de 2025, periodo en el que se operó con la malla de perforación tradicional, y el segundo trimestre de 2025, momento en el que se implementó la malla optimizada basada en el modelo matemático Kuz-Ram y se controló la fragmentación mediante el software Split Online. El análisis se centró en los indicadores operativos más relevantes del ciclo de carguío: producción. (T/H), tiempo de carguío, fragmentación. (P80), factor de carga. (kg/m^3) y costo unitario de producción. (USD/T), los cuales permitieron evaluar de manera integral el impacto de la mejora aplicada en los bancos 2980 y 2995 de la Mina Modelo Superficial.

Los resultados se presentaron siguiendo la estructura de los objetivos específicos, con el propósito de mostrar de manera ordenada cómo la identificación de deficiencias iniciales, la aplicación del modelo Kuz-Ram y la medición digital con Split Online contribuyeron a obtener una mejora sostenible en la eficiencia operativa. Asimismo, se integraron análisis estadísticos comparativos entre ambos periodos, lo cual permitió demostrar la magnitud del cambio obtenido en términos técnicos, productivos y económicos. De esta manera, este capítulo proporcionó la evidencia cuantitativa necesaria para validar las hipótesis planteadas y fundamentar la discusión posterior del estudio. (Cunningham, 1987; Jimeno, 2011)

4.2 Aplicación del modelo de rediseño geométrico por energía específica

El rediseño de los parámetros geométricos de la malla de perforación se realizó mediante un modelo basado en la energía específica, el cual relaciona la carga explosiva por taladro con el volumen de roca influenciado. Este enfoque permitió mantener constante la carga por taladro y ajustar el burden y espaciamiento en función del incremento del factor de carga, pasando de 0.527 a 0.595 kg/m^3 . A diferencia de modelos empíricos como los

propuestos por Ash. (1963) o Konya. (1995), que se basan principalmente en el diámetro del taladro y condiciones generales del macizo rocoso, el modelo de energía específica permite un control directo sobre la fragmentación al modificar la energía aplicada por unidad de volumen. Asimismo, el modelo Kuz–Ram fue empleado como herramienta complementaria para estimar la fragmentación resultante. (P80), permitiendo validar los resultados obtenidos en campo. En este sentido, la combinación del modelo de energía específica para el diseño y el modelo Kuz–Ram para la validación permitió optimizar la malla de perforación y mejorar significativamente los indicadores operativos.

4.2.1 Aplicación del modelo matemático

Datos de partida

- Altura de banco: 15 m
- Diámetro de broca: $12\ 1/4'' = 0.31115\text{ m}$

Primer trimestre:

- Espaciamiento $S_1 = 8.50\text{ m}$
- Burden $B_1 = 7.30\text{ m}$
- Factor de carga $FC_1 = 0.527\text{ kg/m}^3$

Segundo trimestre:

- Factor de carga objetivo $FC_2 = 0.595\text{ kg/m}^3$

4.2.2 Volumen de roca influenciado por taladro en el primer trimestre

$$V_1 = B_1 \times S_1 \times H$$

4.2.3 Carga explosiva por taladro del primer trimestre

$$Q = V_1 \times FC_1 = 930.75 \times 0.527 = 490.11\text{ kg}$$

Este valor se asume aproximadamente constante para el rediseño del segundo trimestre.

4.2.4 Volumen de roca permisible por taladro en el segundo trimestre

Como el factor de carga aumentó, el volumen de roca por taladro debía disminuir.

Entonces:

$$V_2 = \frac{Q}{FC_2}$$

$$V_2 = \frac{490.11}{0.595}$$

$$V_2 = 823.71 \text{ m}^3$$

4.2.5 Relación geométrica inicial entre espaciamento y burden

Se mantuvo la misma proporcionalidad geométrica del primer trimestre:

$$k = \frac{S_1}{B_1}$$

$$k = \frac{8.50}{7.30}$$

$$k = 1.1644$$

Por tanto, para el segundo trimestre:

$$S_2 = k \times B_2$$

4.2.6 Cálculo del nuevo burden del segundo trimestre

Partiendo de:

$$V_2 = B_2 \times S_2 \times H$$

y reemplazando $S_2 = k \times B_2$

$$B_2 = \sqrt{\frac{V_2}{kH}}$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{823.71}{1.1644 \times 15}}$$

$$B_2 = \sqrt{47.16}$$

$$B_2 = 6.87 \text{ m}$$

Despejando:

4.2.7 Cálculo del nuevo espaciamiento del segundo trimestre

$$S_2 = k \times B_2$$

$$S_2 = 1.1644 \times 6.87 = 8.00 \text{ m}$$

4.2.8 Redondeo operativo recomendado

Para fines de diseño de campo, los valores calculados pueden adoptarse como:

$$B \times E = 6.9 \times 8.0$$

Tabla 3

Cuadro comparativo parámetros perforación

Parámetro	Primer trimestre	Segundo trimestre calculado
Altura de banco. (m)	15	15
Diámetro de broca	12 1/4"	12 1/4"
Burden. (m)	7.3	6.87
Espaciamiento. (m)	8.5	8
Factor de carga. (kg/m ³)	0.527	0.595
Volumen por taladro. (m ³)	930.75	823.71
Carga por taladro. (kg)	490.11	490.518

Nota. Propia

Para definir los nuevos parámetros geométricos de la malla de perforación del segundo trimestre, se aplicó un modelo matemático de rediseño basado en la energía específica. Se partió del supuesto de mantener prácticamente constante la carga explosiva por taladro y aumentar el factor de carga de 0.527 a 0.595 kg/m³. En el primer trimestre, con un burden de 7.30 m, un espaciamiento de 8.50 m y una altura de banco de 15 m, el volumen de roca influenciado por taladro fue de 930.75 m³, lo que representó una carga por taladro de 490.11 kg. A partir de esta carga y del nuevo factor de carga del segundo trimestre, se obtuvo un volumen permisible por taladro de 823.71 m³. Manteniendo la misma relación geométrica entre espaciamiento y burden del diseño inicial. (S/B=1.1644), se calculó un nuevo burden de 6.87 m y un nuevo espaciamiento de 8.00 m. Este rediseño permitió incrementar la energía por metro cúbico de roca, justificando matemáticamente la mejora observada en la fragmentación, la productividad y el costo unitario.

4.3 Aplicación del modelo Kuz–Ram

4.3.1 Cálculo del volumen de roca por taladro

La expresión general es:

$$V = B \times S \times H$$

Reemplazando:

$$V = 6.87 \times 8.00 \times 15$$

$$V = 824.4 \text{ m}^3$$

4.3.2 Cálculo de la carga explosiva por taladro

Usando el factor de carga:

$$Q = V \times FC$$

$$Q = 824.4 \times 0.595$$

$$Q = 490.518 \text{ kg}$$

4.3.3 Relación volumen/carga

$$\frac{V}{Q} = \frac{824.4}{490.518}$$

$$\frac{V}{Q} = 1.681$$

4.3.4 Cálculo del tamaño medio del fragmento X50

Para mantener coherencia con la operación real, conviene usar una constante local calibrada a partir del primer trimestre. En el ajuste previo de esta tesis, dicha constante fue:

$$A_L = 83.12$$

Entonces:

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

$$X_{50} = 83.12 \times (1.681)^{0.8}$$

$$(1.681)^{0.8} = 1.515$$

$$X_{50} = 83.12 \times 1.515$$

$$X_{50} = 125.93 \text{ mm}$$

4.3.5 Cálculo del P80 esperado

Para una distribución tipo Rosin–Rammler con exponente de uniformidad aproximado de 1.6, se adopta la relación:

$$P80 \approx 1.571 \times X_{50}$$

Entonces:

$$P80 = 1.571 \times 125.93$$

$$P80 = 197.84 \text{ mm}$$

Convirtiendo a pulgadas:

$$P80 = \frac{197.84}{25.4}$$

$$P80 = 7.79''$$

Según tus resultados generales:

P80 esperado por Kuz–Ram: 7.79"

P80 real medido con Split Online: 6.36"

El modelo Kuz–Ram estimó para el segundo trimestre una fragmentación esperada de 7.79 pulgadas, mientras que el valor real medido en campo fue de 6.36 pulgadas. Esto indica que la fragmentación obtenida en operación fue 18.36% más fina que la proyectada teóricamente. Esta diferencia puede explicarse porque, además del ajuste geométrico del burden y espaciamiento, intervinieron factores operativos favorables no capturados totalmente por el modelo, como el uso de retardos electrónicos, una mejor secuencia de disparo, mejor distribución real del Heavy ANFO y una interacción más eficiente entre taladros.

En consecuencia, el modelo Kuz–Ram permitió proyectar correctamente la tendencia de mejora de la fragmentación, aunque subestimó el nivel real de finura alcanzado en campo. Esto valida que la optimización aplicada durante el segundo trimestre fue técnicamente efectiva y que el sistema de voladura operó con mayor eficiencia que la predicha por el modelo matemático.

Para el segundo trimestre se aplicó el modelo Kuz–Ram con el fin de estimar la fragmentación esperada a partir de los parámetros de perforación y voladura optimizados. Considerando un banco de 15 m de altura, taladros de 12 1/4", burden de 6.87 m, espaciamiento de 8.00 m y un factor de carga de 0.595 kg/m³, se obtuvo un volumen de roca por taladro de 824.4 m³ y una carga explosiva de 490.518 kg por

taladro. Con estos valores, y empleando una constante local calibrada de 83.12, se determinó un tamaño medio de fragmento $X_{50}X_{50}$ de 125.93 mm.

Posteriormente, mediante la relación granulométrica de Rosin–Rammler, se estimó un P80P80P80 esperado de 197.84 mm, equivalente a 7.79 pulgadas. Sin embargo, el valor real registrado mediante Split Online fue de 6.36 pulgadas, lo que evidenció una fragmentación 18.36% más fina que la proyectada por el modelo. Este resultado confirmó que la optimización aplicada en campo, junto con el uso de Heavy ANFO y retardos electrónicos, permitió obtener un desempeño superior al estimado teóricamente, mejorando de manera significativa la fragmentación, la productividad y el costo unitario de producción.

4.4 Resultados por objetivos

4.4.1 Resultados del objetivo específico 1

Identificar las deficiencias técnicas de la malla de perforación aplicada en el primer trimestre del 2025

Durante el primer trimestre del año 2025, la malla de perforación aplicada en la Mina Modelo Superficial presentó deficiencias geométricas que afectaron la eficiencia de la voladura y la calidad de la fragmentación. Los parámetros iniciales registraron un burden promedio de 7.3 m, un espaciamiento de 8.5 m y un factor de carga de 0.527 kg/m³, valores que, aunque operativamente estables, generaron un tamaño de fragmento superior al esperado. El análisis realizado mediante el software Split Online arrojó un P80 promedio de 8.59 pulgadas, evidenciando una fragmentación gruesa con presencia de bloques sobredimensionados, lo cual aumentó los tiempos de carguío y redujo la eficiencia de los equipos.

La productividad promedio del carguío. (T/H) alcanzó 2,368.90 toneladas por hora, mientras que el tiempo de ciclo promedió 2.56 minutos, evidenciando una operación

lenta y con sobrecarga en los equipos. Asimismo, el costo unitario de producción. (USD/T) se situó en 0.68, reflejando el impacto económico negativo de la fragmentación ineficiente. Estos resultados confirmaron que la malla inicial no garantizaba una distribución uniforme de energía ni una fragmentación controlada, lo que justificó la necesidad de una optimización técnica. (Jimeno, 2011; Konya & Walter, 1990)

Tabla 4

Parámetros primer trimestre

Mes	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	2,375.73	2.57	8.61	0.523	0.68
Mes 2	2,368.87	2.57	8.60	0.527	0.69
Mes 3	2,362.10	2.54	8.56	0.530	0.68
Total	2,368.98	2.56	8.59	0.527	0.68

Nota. Resultados de los parámetros de producción, tiempo de carguío de pala, fragmentación, factor de potencia y costo de unitario de producción de los meses de enero, febrero y marzo del 2025.

Durante el primer trimestre de 2025, los indicadores evidenciaron que la operación presentó limitaciones asociadas a una fragmentación deficiente y a la ineficiencia del ciclo de carguío. El valor promedio del P80. (8.59 pulgadas) mostró una distribución granulométrica gruesa, con presencia de bloques sobredimensionados que dificultaron el llenado de las tolvas y exigieron mayor esfuerzo a los equipos de operación. Esta condición se reflejó en un tiempo de carguío promedio de 2.56 minutos, el cual resultó elevado y restringió la capacidad de respuesta de la flota. De manera complementaria, la producción de carguío. (2,368.90 T/H) se mantuvo por debajo de los niveles esperados para un banco de similares características, confirmando que la malla de perforación inicial no generaba una rotura eficiente del macizo rocoso.

Asimismo, los valores del factor de carga. (0.527 kg/m^3) y el costo unitario. (0.68 USD/T) mostraron un desempeño desfavorable. El bajo factor de carga indicó un aprovechamiento limitado de la energía del explosivo, lo cual contribuyó directamente a la fragmentación gruesa registrada. Por su parte, el mayor costo unitario reflejó el incremento en el tiempo de operación, el desgaste de los equipos y las posibles intervenciones correctivas asociadas a material sobredimensionado. En conjunto, estos resultados evidenciaron la necesidad de aplicar una optimización en la malla de perforación para mejorar la eficiencia técnica y económica del proceso.

4.4.2 Resultados del objetivo específico 2

Aplicar el modelo Kuz-Ram para determinar los parámetros óptimos de burden, espaciamiento y factor de carga

Durante el segundo trimestre de 2025, se implementó la optimización de la malla de perforación empleando el modelo matemático de Kuz-Ram, que permitió calcular el tamaño medio de fragmento esperado. (X_{50}) y ajustar los parámetros de perforación. Los nuevos valores establecidos burden de 6.87 m , espaciamiento de 8.0 m y factor de carga de 0.595 kg/m^3 lograron mejorar el aprovechamiento energético del explosivo, generando una voladura más eficiente y homogénea.

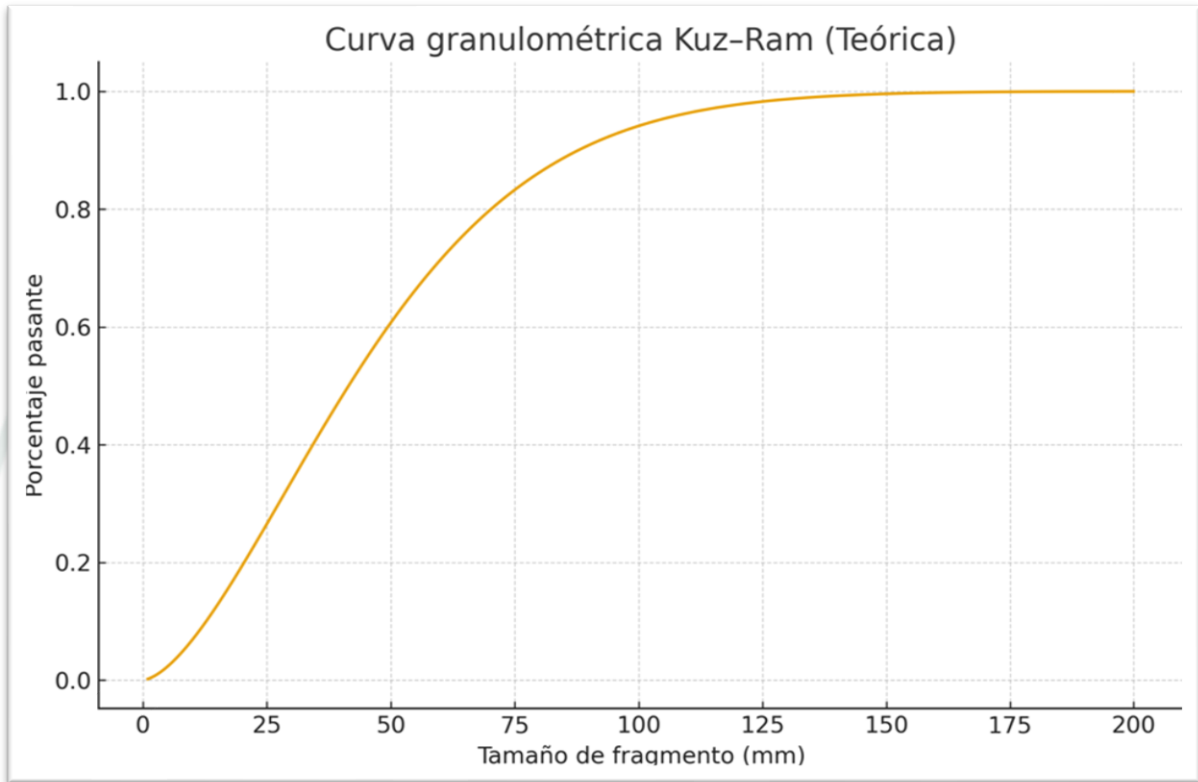
Los resultados comparativos demostraron un incremento de 14.86% en la productividad. (T/H), pasando de $2,368.9$ a $2,720.88$ toneladas por hora. El tiempo de carguío se redujo de 2.56 a 2.31 minutos. (-9.68%), mientras que la fragmentación. (P_{80}) mejoró significativamente de 8.59 a 6.36 pulgadas. (-25.94%) De igual manera, el factor de carga aumentó a 0.595 kg/m^3 . ($+12.92\%$), indicando un uso más eficiente del explosivo, y el costo unitario. (USD/T) disminuyó de 0.68 a 0.61 . (-10.29%)

Estos resultados evidenciaron la eficacia del modelo Kuz-Ram como herramienta predictiva en el diseño de voladuras a cielo abierto, al mejorar el control sobre el tamaño

de fragmento y optimizar la relación energía-volumen del material. (Cunningham, 1987; Lilly, 1986)

Figura 1

Curva Kuz Ram



Nota. La figura muestra la curva granulométrica teórica estimada mediante el modelo Kuz-Ram, representando el porcentaje pasante en función del tamaño del fragmento. La curva sirve como referencia comparativa frente a la granulometría real obtenida por Split Online en la operación evaluada.

4.4.3 Resultados del objetivo específico 3

Evaluar los resultados de fragmentación obtenidos con Split Online antes y después de la optimización

La evaluación de la fragmentación mediante el software Split Online permitió obtener una medición precisa y continua de la granulometría del material volado.

Durante el primer trimestre, las imágenes procesadas mostraron una distribución irregular, con alta proporción de bloques mayores a 12 pulgadas. Sin embargo, tras la

implementación de la malla optimizada, el sistema registró una disminución significativa del tamaño medio del fragmento y un mayor porcentaje de partículas dentro del rango operativo óptimo para el carguío y chancado.

El valor promedio del P80 se redujo de 8.59 a 6.36 pulgadas. (-25.94%), mientras que la producción de carguío. (T/H) se incrementó en 14.86%, evidenciando que una fragmentación más fina facilitó el llenado de tolvas y redujo los tiempos de descarga. En concordancia, el tiempo de carguío se redujo de 2.56 a 2.31 minutos, lo que mejoró la eficiencia del ciclo operativo. Estos resultados confirmaron que el uso de herramientas tecnológicas como Split Online contribuyó al control de calidad de la fragmentación y permitió cuantificar con precisión los beneficios de la optimización aplicada. (Maerz, 2002; Kemeny, 2017)

Tabla 5

Parámetros del segundo trimestre

Mes	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	2,734.65	2.31	6.32	0.596	0.61
Mes 2	2,724.16	2.32	6.33	0.596	0.61
Mes 3	2,703.83	2.31	6.44	0.592	0.62
Total	2,721.25	2.31	6.36	0.595	0.61

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de carga y costo unitario de producción del segundo trimestre 2025

Durante el segundo trimestre de 2025, los indicadores operativos evidenciaron una mejora notable en comparación con el periodo inicial sin optimización. La aplicación de la nueva malla de perforación diseñada con burden de 6.87 m, espaciamiento de 8.0 m y un incremento del factor de carga a 0.595 kg/m³ permitió obtener una fragmentación más fina y homogénea. Esto se reflejó en una reducción significativa del P80 de 8.59 a

6.36 pulgadas, equivalente a una mejora del -25.94% , lo cual facilitó el carguío, redujo la presencia de bloques sobredimensionados y disminuyó la necesidad de intervenciones correctivas en el frente de voladura. Paralelamente, el tiempo de carguío disminuyó a 2.31 minutos. (-9.68%), indicando una mayor fluidez en el ciclo operativo de los equipos y una reducción de los tiempos muertos asociados al manejo de material grueso.

Asimismo, la fragmentación optimizada impactó directamente en la productividad y en los costos unitarios. La producción de carguío aumentó de 2,368.90 a 2,720.88 T/H, equivalente a un incremento del 14.86% , demostrando que la mejor calidad granulométrica permitió aprovechar de forma más eficiente la capacidad de los equipos. De manera complementaria, el costo unitario de producción disminuyó en 10.29% , pasando de 0.68 a 0.61 USD/T, lo que evidencia un mejor uso de los recursos energéticos, menores esfuerzos en chancado y mayor estabilidad en el proceso de carguío y transporte. En conjunto, los resultados del segundo trimestre confirmaron que la optimización de la malla de perforación generó mejoras operativas y económicas significativas, alineándose con lo predicho por el modelo Kuz–Ram y validando la pertinencia técnica de la intervención.

4.4.4 Análisis general de resultados

El análisis comparativo entre ambos periodos evidenció mejoras técnicas y económicas notables tras la optimización de la malla de perforación. La reducción del P80 en 25.94% demostró una fragmentación más adecuada para el proceso de carguío y chancado, generando una mayor fluidez operativa y menor necesidad de voladura secundaria. A nivel productivo, el aumento del 14.86% en T/H y la reducción del 9.68% en tiempo de ciclo reflejaron una mayor disponibilidad y rendimiento de los equipos. Asimismo, el costo unitario. (USD/T) se redujo en 10.29% , confirmando que la mejora técnica también tuvo impacto económico directo.

Estos resultados consolidaron la hipótesis general, demostrando que la optimización de la malla de perforación permitió mejorar la fragmentación y aumentar la productividad minera. Además, validaron la efectividad del modelo Kuz-Ram y del software Split Online como herramientas complementarias para el diseño, control y evaluación de voladuras en minería superficial. (Cunningham, 1987; Jimeno, 2011)

Tabla 6

Parámetros enero 2025

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Primer trimestre	Mes 1	Enero	01/01/2025	2,254.00	2.66	8.56	0.505	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	02/01/2025	2,265.00	2.58	8.68	0.523	0.70
Primer trimestre	Mes 1	Enero	03/01/2025	2,388.00	2.69	8.77	0.542	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	04/01/2025	2,316.00	2.51	8.80	0.515	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	05/01/2025	2,307.00	2.44	8.81	0.508	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	06/01/2025	2,476.00	2.64	8.58	0.528	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	07/01/2025	2,308.00	2.52	8.44	0.513	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	08/01/2025	2,394.00	2.60	8.19	0.512	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	09/01/2025	2,351.00	2.62	8.61	0.522	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	10/01/2025	2,437.00	2.52	8.61	0.520	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	11/01/2025	2,471.00	2.63	8.40	0.512	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	12/01/2025	2,479.00	2.63	8.82	0.526	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	13/01/2025	2,266.00	2.61	9.00	0.554	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	14/01/2025	2,422.00	2.62	8.15	0.549	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	15/01/2025	2,281.00	2.66	8.56	0.548	0.70
Primer trimestre	Mes 1	Enero	16/01/2025	2,384.00	2.66	8.68	0.521	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	17/01/2025	2,338.00	2.64	8.65	0.530	0.70
Primer trimestre	Mes 1	Enero	18/01/2025	2,263.00	2.47	8.74	0.513	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	19/01/2025	2,493.00	2.56	8.80	0.500	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	20/01/2025	2,408.00	2.51	8.93	0.515	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	21/01/2025	2,375.00	2.44	8.25	0.533	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	22/01/2025	2,371.00	2.46	8.29	0.531	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	23/01/2025	2,460.00	2.45	8.80	0.523	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	24/01/2025	2,314.00	2.57	8.71	0.533	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	25/01/2025	2,346.00	2.64	8.50	0.508	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	26/01/2025	2,386.00	2.58	8.28	0.543	0.69
Primer trimestre	Mes 1	Enero	27/01/2025	2,452.00	2.70	8.68	0.528	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	28/01/2025	2,411.00	2.50	9.00	0.515	0.67
Primer trimestre	Mes 1	Enero	29/01/2025	2,359.00	2.58	8.79	0.519	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	30/01/2025	2,497.00	2.46	8.33	0.505	0.68
Primer trimestre	Mes 1	Enero	31/01/2025	2,284.00	2.61	8.88	0.517	0.70
			Promedio	2,372.77	2.57	8.62	0.523	0.68

Nota. Los valores presentados corresponden a los registros diarios del mes de enero del primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), tiempo de carguío, fragmentación. (P80), factor de carga y costo unitario, cuyos promedios permiten caracterizar el desempeño operativo previo a la implementación de la malla optimizada.

Los resultados operativos registrados durante enero del primer trimestre mostraron un comportamiento consistente con una fragmentación deficiente y poco uniforme, reflejada en un P80 promedio de 8.62 pulgadas, con valores diarios que oscilaron entre 8.15” y 9.00”. Esta variabilidad evidenció una entrega irregular de energía durante la voladura, posiblemente asociada a un factor de carga limitado. (promedio 0.523 kg/m³) y a la geometría inicial de la malla de perforación. Como consecuencia, la fragmentación gruesa incrementó el esfuerzo requerido por los equipos de carguío, generando tiempos de ciclo relativamente altos. (2.57 minutos), los cuales restringieron el rendimiento y afectaron la fluidez del proceso operacional.

En relación con la productividad, la producción de carguío promedio fue de 2,372.77 T/H, manteniéndose por debajo del nivel esperado para bancos de 15 m con equipos de capacidad estándar. Esta condición estuvo directamente influenciada por la granulometría gruesa, pues la presencia frecuente de bloques sobredimensionados redujo la eficiencia del llenado de tolvas y aumentó los tiempos no productivos. Finalmente, el costo unitario por tonelada. (0.68 USD/T) se mantuvo elevado para un escenario sin condiciones operativas atípicas, reflejando el impacto económico de una malla de perforación que no lograba generar la fragmentación requerida para una operación eficiente. En conjunto, los resultados de enero confirmaron la necesidad de optimizar los parámetros de perforación y voladura para mejorar la fragmentación y elevar la productividad global.

Tabla 7**Parámetros de febrero 2025**

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	01/02/2025	2,375.00	2.56	8.94	0.545	0.67
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	02/02/2025	2,454.00	2.47	8.43	0.511	0.68
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	03/02/2025	2,381.00	2.55	8.83	0.513	0.70
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	04/02/2025	2,431.00	2.67	8.37	0.544	0.67
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	05/02/2025	2,289.00	2.44	8.91	0.531	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	06/02/2025	2,259.00	2.68	8.58	0.550	0.70
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	07/02/2025	2,402.00	2.63	8.25	0.553	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	08/02/2025	2,291.00	2.50	8.24	0.500	0.67
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	09/02/2025	2,434.00	2.59	8.98	0.515	0.70
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	10/02/2025	2,277.00	2.45	8.78	0.550	0.70
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	11/02/2025	2,397.00	2.50	8.72	0.542	0.67
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	12/02/2025	2,352.00	2.63	8.63	0.551	0.70
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	13/02/2025	2,328.00	2.55	8.52	0.521	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	14/02/2025	2,367.00	2.63	8.61	0.507	0.67
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	15/02/2025	2,365.00	2.57	8.70	0.521	0.68
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	16/02/2025	2,442.00	2.47	8.52	0.525	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	17/02/2025	2,411.00	2.61	8.77	0.515	0.68
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	18/02/2025	2,420.00	2.64	8.28	0.506	0.68
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	19/02/2025	2,333.00	2.47	8.51	0.508	0.67
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	20/02/2025	2,357.00	2.70	8.17	0.535	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	21/02/2025	2,463.00	2.67	8.93	0.518	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	22/02/2025	2,402.00	2.46	8.62	0.522	0.70
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	23/02/2025	2,404.00	2.61	8.49	0.504	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	24/02/2025	2,465.00	2.64	8.60	0.537	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	25/02/2025	2,286.00	2.63	8.78	0.539	0.69
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	26/02/2025	2,460.00	2.49	8.67	0.547	0.70
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	27/02/2025	2,294.00	2.44	8.30	0.517	0.67
Primer trimestre	Mes 2	Febrero	28/02/2025	2,446.00	2.68	8.67	0.534	0.67
			Promedio	2,378.04	2.57	8.60	0.527	0.69

Nota. Los valores registrados corresponden al desempeño diario del mes de febrero durante el primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), tiempo de carguío, fragmentación. (P80), factor de carga y costo unitario. El promedio mensual refleja el comportamiento operativo previo a la optimización de la malla de perforación.

Durante el mes de febrero del primer trimestre, los indicadores operativos mantuvieron un comportamiento similar al observado en enero, evidenciando nuevamente una fragmentación gruesa y poco uniforme, reflejada en un P80 promedio de 8.60 pulgadas. Los valores diarios oscilaron entre 8.17” y 8.98”, lo que mostró una mayor dispersión granulométrica, típica de una voladura con deficiencias en la energía disponible o variabilidad en el macizo rocoso. Esta condición de fragmentación continuó afectando la eficiencia del ciclo de carguío, manteniendo el tiempo promedio de 2.57 minutos, una cifra elevada considerando los equipos utilizados y las condiciones del banco. La presencia de bloques grandes y partículas de gran tamaño siguió generando demoras en el llenado de tolvas y ciclos operativos menos fluidos.

En cuanto a la productividad, la producción promedio alcanzó los 2,378.04 T/H, mostrando un leve incremento frente a enero; sin embargo, este valor continuó siendo inferior a los niveles esperados en condiciones óptimas de fragmentación. De manera complementaria, el factor de carga promedio aumentó ligeramente a 0.527 kg/m³, aunque insuficiente para generar una rotura más eficiente del macizo rocoso. Asimismo, el costo unitario se mantuvo en 0.69 USD/T, lo cual evidenció que el proceso seguía impactado por la granulometría gruesa y la falta de uniformidad en la voladura. En conjunto, los resultados de febrero confirmaron que la malla de perforación inicial no garantizaba una fragmentación adecuada, reafirmando la necesidad de aplicar la optimización implementada posteriormente en el segundo trimestre.

Tabla 8*Parámetros de marzo 2025*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	01/03/2025	2,286.00	2.69	8.70	0.527	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	02/03/2025	2,280.00	2.44	8.29	0.517	0.70
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	03/03/2025	2,360.00	2.44	8.90	0.511	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	04/03/2025	2,286.00	2.67	8.68	0.539	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	05/03/2025	2,486.00	2.52	8.49	0.546	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	06/03/2025	2,272.00	2.54	8.88	0.522	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	07/03/2025	2,495.00	2.65	8.80	0.513	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	08/03/2025	2,280.00	2.45	8.84	0.524	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	09/03/2025	2,291.00	2.46	8.43	0.511	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	10/03/2025	2,352.00	2.66	8.26	0.507	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	11/03/2025	2,403.00	2.67	8.33	0.512	0.70
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	12/03/2025	2,368.00	2.51	8.37	0.503	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	13/03/2025	2,280.00	2.54	8.31	0.554	0.68
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	14/03/2025	2,336.00	2.50	8.26	0.538	0.68
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	15/03/2025	2,329.00	2.65	8.47	0.525	0.70
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	16/03/2025	2,479.00	2.47	8.68	0.554	0.70
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	17/03/2025	2,321.00	2.60	8.13	0.516	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	18/03/2025	2,350.00	2.53	8.74	0.528	0.70
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	19/03/2025	2,438.00	2.45	8.84	0.548	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	20/03/2025	2,346.00	2.66	8.55	0.543	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	21/03/2025	2,308.00	2.44	9.00	0.537	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	22/03/2025	2,468.00	2.63	8.32	0.539	0.68
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	23/03/2025	2,422.00	2.48	8.82	0.534	0.68
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	24/03/2025	2,338.00	2.53	8.60	0.533	0.70
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	25/03/2025	2,359.00	2.57	8.92	0.552	0.68
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	26/03/2025	2,398.00	2.45	8.96	0.541	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	27/03/2025	2,344.00	2.50	8.17	0.534	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	28/03/2025	2,481.00	2.65	8.57	0.522	0.70
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	29/03/2025	2,267.00	2.65	8.23	0.534	0.67
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	30/03/2025	2,336.00	2.46	8.23	0.553	0.69
Primer trimestre	Mes 3	Marzo	31/03/2025	2,308.00	2.45	8.44	0.509	0.67
Promedio				2,362.18	2.55	8.55	0.531	0.68

Nota. Los valores corresponden al registro diario del mes de marzo durante el primer trimestre, incluyendo producción. (T/H), tiempo de carguío, fragmentación. (P80), factor de carga y costo unitario. El promedio mensual resume el comportamiento operacional antes de la aplicación de la malla de perforación optimizada.

Durante el mes de febrero del primer trimestre, los indicadores operativos mantuvieron un comportamiento similar al observado en enero, evidenciando nuevamente una fragmentación gruesa y poco uniforme, reflejada en un P80 promedio de 8.60 pulgadas. Los valores diarios oscilaron entre 8.17” y 8.98”, lo que mostró una mayor dispersión granulométrica, típica de una voladura con deficiencias en la energía disponible o variabilidad en el macizo rocoso. Esta condición de fragmentación continuó afectando la eficiencia del ciclo de carguío, manteniendo el tiempo promedio de 2.57 minutos, una cifra elevada considerando los equipos utilizados y las condiciones del banco. La presencia de bloques grandes y partículas de gran tamaño siguió generando demoras en el llenado de tolvas y ciclos operativos menos fluidos.

En cuanto a la productividad, la producción promedio alcanzó los 2,378.04 T/H, mostrando un leve incremento frente a enero; sin embargo, este valor continuó siendo inferior a los niveles esperados en condiciones óptimas de fragmentación. De manera complementaria, el factor de carga promedio aumentó ligeramente a 0.527 kg/m³, aunque insuficiente para generar una rotura más eficiente del macizo rocoso. Asimismo, el costo unitario se mantuvo en 0.69 USD/T, lo cual evidenció que el proceso seguía impactado por la granulometría gruesa y la falta de uniformidad en la voladura. En conjunto, los resultados de febrero confirmaron que la malla de perforación inicial no garantizaba una fragmentación adecuada, reafirmando la necesidad de aplicar la optimización implementada posteriormente en el segundo trimestre.

Tabla 9

Parámetros de abril del 2025

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	01/04/2025	2,292.00	2.49	8.36	0.541	0.67
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	02/04/2025	2,664.00	2.24	6.26	0.605	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	03/04/2025	2,820.00	2.33	6.34	0.591	0.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	04/04/2025	2,677.00	2.31	6.40	0.592	0.63
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	05/04/2025	2,851.00	2.24	6.59	0.610	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	06/04/2025	2,634.00	2.25	6.01	0.605	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	07/04/2025	2,850.00	2.27	6.16	0.586	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	08/04/2025	2,619.00	2.24	6.24	0.584	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	09/04/2025	2,610.00	2.29	6.22	0.591	0.63
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	10/04/2025	2,844.00	2.41	6.40	0.611	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	11/04/2025	2,771.00	2.36	6.13	0.611	0.63
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	12/04/2025	2,601.00	2.28	6.16	0.597	0.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	13/04/2025	2,646.00	2.35	6.10	0.602	0.62
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	14/04/2025	2,662.00	2.41	6.25	0.610	0.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	15/04/2025	2,701.00	2.25	6.14	0.589	0.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	16/04/2025	2,846.00	2.39	6.54	0.592	0.62
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	17/04/2025	2,843.00	2.42	6.44	0.602	0.62
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	18/04/2025	2,618.00	2.33	6.12	0.598	0.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	19/04/2025	2,769.00	2.38	6.07	0.594	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	20/04/2025	2,820.00	2.23	6.48	0.596	0.62
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	21/04/2025	2,687.00	2.25	6.46	0.586	0.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	22/04/2025	2,687.00	2.24	6.08	0.603	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	23/04/2025	2,817.00	2.42	6.53	0.589	0.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	24/04/2025	2,693.00	2.35	6.50	0.594	0.63
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	25/04/2025	2,797.00	2.38	6.54	0.607	0.63
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	26/04/2025	2,691.00	2.22	6.47	0.585	0.62
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	27/04/2025	2,605.00	2.22	6.40	0.602	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	28/04/2025	2,820.00	2.40	6.18	0.589	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	29/04/2025	2,748.00	2.33	6.33	0.584	0.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	30/04/2025	2,705.00	2.25	6.42	0.598	0.61
Promedio				2,712.93	2.32	6.38	0.595	0.61

Nota. La tabla presenta los registros diarios del mes de abril del segundo trimestre, donde se observan mejoras significativas en producción, tiempo de carguío y fragmentación. (P80) asociadas a la implementación de la malla de perforación optimizada. El promedio mensual resume el desempeño operativo inicial posterior a la mejora.

Durante abril, correspondiente al primer mes del segundo trimestre, los indicadores operativos mostraron una mejora clara y sostenida respecto al comportamiento registrado en el primer trimestre. La aplicación de la malla optimizada con un incremento del factor de carga a valores cercanos a 0.595 kg/m^3 permitió obtener una fragmentación mucho más fina, reflejada en un P80 promedio de 6.38 pulgadas, lo que representó una reducción sustancial respecto al promedio de 8.60" observado en febrero. Esta mejora granulométrica se relacionó directamente con la reducción del tiempo de carguío a 2.32 minutos, evidenciando un ciclo operativo más fluido y con menos interrupciones por material grueso o bloques sobredimensionados. La consistencia en los valores diarios de P80, que oscilaron entre 6.01" y 6.59", también reflejó mayor homogeneidad en la voladura, indicando una correcta interacción entre burden, espaciamiento y energía explosiva.

En términos productivos, la producción promedio alcanzó los 2,712.93 T/H, marcando un aumento considerable respecto a los promedios del primer trimestre. ($\approx 2,372\text{--}2,378 \text{ T/H}$) Esta diferencia, superior al 14%, demostró que la fragmentación adecuada facilitó el llenado de las tolvas y redujo los tiempos muertos, mejorando la eficiencia global del carguío. A nivel económico, el costo unitario disminuyó a 0.61 USD/T, reflejando un proceso más estable y menos demandante para los equipos. La combinación de mejor fragmentación, ciclos más cortos y mayor producción permitió consolidar abril como un mes operativo significativamente más eficiente, validando plenamente el impacto positivo de la optimización de la malla de perforación implementada en el segundo trimestre.

Tabla 10**Parámetros de mayo del 2025**

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	01/05/2025	2,849.00	2.37	6.59	0.586	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	02/05/2025	2,829.00	2.26	6.50	0.597	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	03/05/2025	2,701.00	2.30	6.05	0.609	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	04/05/2025	2,643.00	2.24	6.24	0.592	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	05/05/2025	2,675.00	2.41	6.13	0.595	0.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	06/05/2025	2,663.00	2.25	6.36	0.601	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	07/05/2025	2,827.00	2.23	6.41	0.610	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	08/05/2025	2,613.00	2.30	6.40	0.589	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	09/05/2025	2,602.00	2.24	6.22	0.584	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	10/05/2025	2,857.00	2.28	6.27	0.586	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	11/05/2025	2,609.00	2.39	6.02	0.584	0.63
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	12/05/2025	2,774.00	2.37	6.54	0.596	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	13/05/2025	2,600.00	2.32	6.52	0.607	0.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	14/05/2025	2,632.00	2.33	6.27	0.591	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	15/05/2025	2,723.00	2.37	6.01	0.599	0.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	16/05/2025	2,709.00	2.41	6.09	0.594	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	17/05/2025	2,766.00	2.33	6.48	0.606	0.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	18/05/2025	2,856.00	2.38	6.43	0.594	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	19/05/2025	2,689.00	2.36	6.47	0.611	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	20/05/2025	2,833.00	2.38	6.57	0.602	0.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	21/05/2025	2,754.00	2.33	6.51	0.584	0.63
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	22/05/2025	2,664.00	2.26	6.11	0.601	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	23/05/2025	2,718.00	2.36	6.59	0.587	0.63
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	24/05/2025	2,717.00	2.25	6.36	0.608	0.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	25/05/2025	2,754.00	2.21	6.48	0.605	0.63
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	26/05/2025	2,805.00	2.34	6.59	0.601	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	27/05/2025	2,728.00	2.30	6.44	0.592	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	28/05/2025	2,801.00	2.29	6.09	0.585	0.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	29/05/2025	2,642.00	2.23	6.20	0.609	0.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	30/05/2025	2,825.00	2.31	6.37	0.584	0.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	31/05/2025	2,714.00	2.26	6.49	0.588	0.62
Promedio				2,728.13	2.31	6.35	0.596	0.61

Nota. La tabla recoge los registros diarios del mes de mayo del segundo trimestre, evidenciando una fragmentación más fina, mayor productividad y menores tiempos de carguío como resultado de la aplicación continua de la malla de perforación optimizada. El promedio mensual resume el desempeño operacional consolidado posterior a la mejora.

Durante el mes de mayo, correspondiente al segundo mes del segundo trimestre, los resultados operativos confirmaron la estabilidad y consolidación de las mejoras logradas con la malla de perforación optimizada. La producción promedio alcanzó 2,728.13 T/H, ligeramente superior al valor registrado en abril. (2,712.93 T/H), lo que reflejó una continuidad en el buen desempeño del proceso de carguío. Esta tendencia positiva estuvo asociada a tiempos de ciclo más cortos, con un tiempo promedio de 2.31 minutos, que evidenció la fluidez del ciclo operativo y la ausencia de interrupciones significativas por material sobredimensionado. La constancia de estos valores a lo largo del mes indicó que el rediseño de la voladura no solo mejoró la eficiencia, sino que también permitió mantenerla de manera sostenida frente a la variabilidad operacional cotidiana.

En cuanto a la fragmentación, se registró un P80 promedio de 6.35 pulgadas, en línea con los valores óptimos esperados tras la aplicación del modelo Kuz–Ram. La variación diaria del P80 se mantuvo dentro de rangos estrechos. (entre 6.01” y 6.59”), lo cual evidenció un buen control granulométrico y una fragmentación más uniforme que en el primer trimestre. De manera complementaria, el factor de carga promedio aumentó a 0.596 kg/m³, lo que permitió una liberación de energía más efectiva en el frente de voladura, favoreciendo la reducción de tamaños y la continuidad del proceso. Finalmente, el costo unitario se mantuvo estable en 0.61 USD/T, reflejando una operación más eficiente y rentable. En conjunto, los resultados de mayo confirmaron que la optimización de la malla de perforación no solo generó mejoras iniciales, sino que también sostuvo un desempeño operativo superior a lo largo del tiempo.

Tabla 11***Parámetros de junio del 2025***

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/M3	USD/T
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	01/06/2025	2,851.00	2.37	6.49	0.601	0.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	02/06/2025	2,704.00	2.40	6.02	0.587	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	03/06/2025	2,685.00	2.21	6.58	0.590	0.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	04/06/2025	2,671.00	2.38	6.52	0.595	0.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	05/06/2025	2,691.00	2.24	6.58	0.591	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	06/06/2025	2,814.00	2.23	6.28	0.605	0.60
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	07/06/2025	2,695.00	2.23	6.40	0.586	0.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	08/06/2025	2,647.00	2.37	6.06	0.601	0.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	09/06/2025	2,652.00	2.31	6.31	0.585	0.60
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	10/06/2025	2,732.00	2.33	6.47	0.590	0.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	11/06/2025	2,656.00	2.36	6.58	0.595	0.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	12/06/2025	2,608.00	2.32	6.46	0.610	0.60
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	13/06/2025	2,807.00	2.29	6.31	0.585	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	14/06/2025	2,845.00	2.38	6.40	0.585	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	15/06/2025	2,650.00	2.36	6.43	0.589	0.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	16/06/2025	2,727.00	2.35	6.22	0.593	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	17/06/2025	2,689.00	2.23	6.48	0.585	0.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	18/06/2025	2,843.00	2.39	6.34	0.587	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	19/06/2025	2,666.00	2.37	6.26	0.600	0.60
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	20/06/2025	2,769.00	2.33	6.05	0.608	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	21/06/2025	2,605.00	2.24	6.01	0.591	0.60
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	22/06/2025	2,706.00	2.37	6.42	0.588	0.61

Segundo trimestre	Mes 3	Junio	23/06/2025	2,857.00	2.38	6.38	0.601	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	24/06/2025	2,706.00	2.26	6.54	0.597	0.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	25/06/2025	2,705.00	2.27	6.58	0.591	0.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	26/06/2025	2,753.00	2.27	6.03	0.596	0.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	27/06/2025	2,807.00	2.27	6.55	0.593	0.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	28/06/2025	2,669.00	2.34	6.11	0.593	0.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	29/06/2025	2,659.00	2.28	6.44	0.594	0.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	30/06/2025	2,805.00	2.24	6.49	0.592	0.61
Promedio				2,722.47	2.31	6.36	0.593	0.62

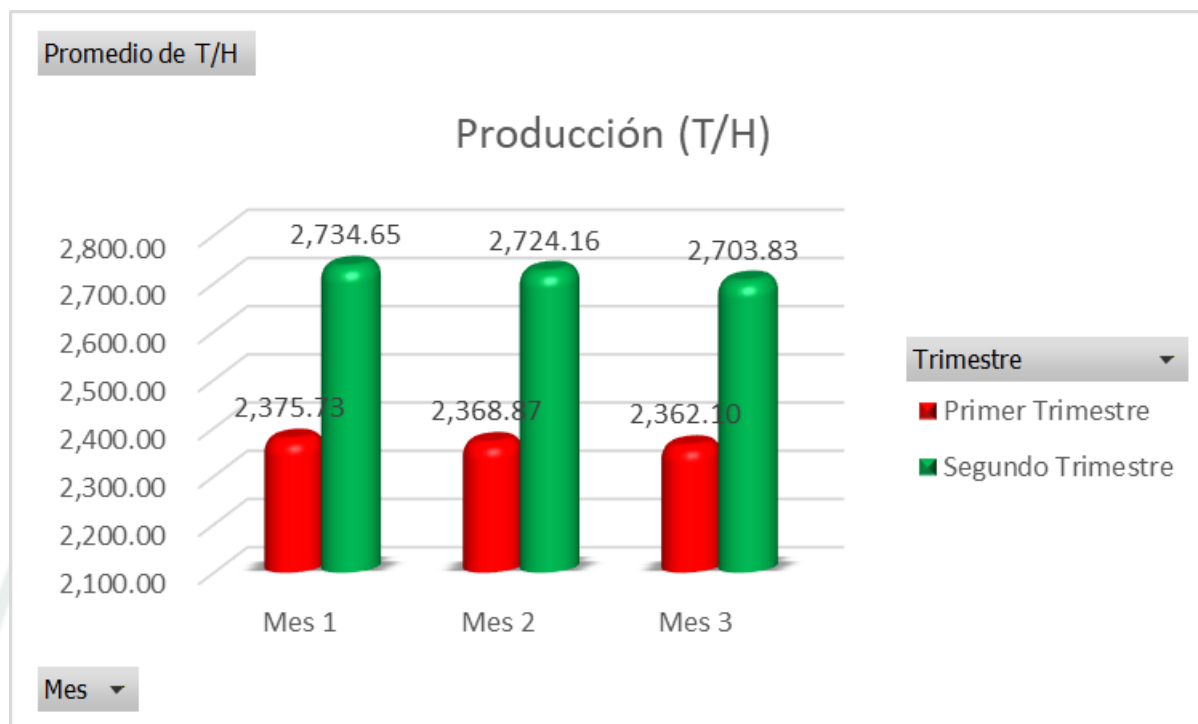
Nota. La tabla presenta los registros diarios del mes de junio del segundo trimestre, evidenciando la estabilidad de los indicadores operativos bajo la malla optimizada, con mejoras sostenidas en fragmentación. (P80), tiempos de carguío y productividad. El promedio mensual resume el comportamiento final del trimestre posterior a la optimización.

Durante junio, mes que cerró el segundo trimestre, los indicadores operativos evidenciaron la consolidación definitiva de las mejoras generadas por la optimización de la malla de perforación, alcanzando niveles estables y repetitivos que confirmaron el éxito del diseño aplicado. La producción promedio registrada fue de 2,722.47 T/H, manteniéndose en el mismo rango elevado observado en abril y mayo, lo que demuestra que la operación logró sostener ciclos de carguío eficientes a lo largo del mes. El tiempo promedio de ciclo se mantuvo en 2.31 minutos, reflejando un proceso continuo, sin interrupciones significativas por presencia de material grueso o por maniobras adicionales en el punto de carguío. Esta estabilidad operacional es consistente con una fragmentación adecuada y homogénea, que facilitó la manipulación del material y optimizó la interacción entre la pala y los camiones.

En relación con la granulometría, el P80 promedio de 6.36 pulgadas confirmó que la fragmentación fina obtenida tras la optimización se mantuvo constante a lo largo del mes, con variaciones diarias que oscilaron entre 6.01” y 6.58”, evidenciando un control adecuado del tamaño de fragmento. De manera complementaria, el factor de carga promedio fue de 0.593 kg/m³, en línea con los parámetros establecidos en el rediseño de la malla, lo que permitió una liberación de energía suficiente para inducir una rotura eficiente del macizo rocoso. Finalmente, el costo unitario promedio de 0.62 USD/T reflejó un proceso económicamente estable, con menores costos asociados a manipulación, carguío y transporte, lo que contribuyó a mejorar la rentabilidad global de la operación. En conjunto, los resultados de junio confirmaron que la mejora implementada en el segundo trimestre no solo fue efectiva, sino también sostenible en el tiempo y replicable en condiciones operativas similares.

Figura 2

Producción mensual

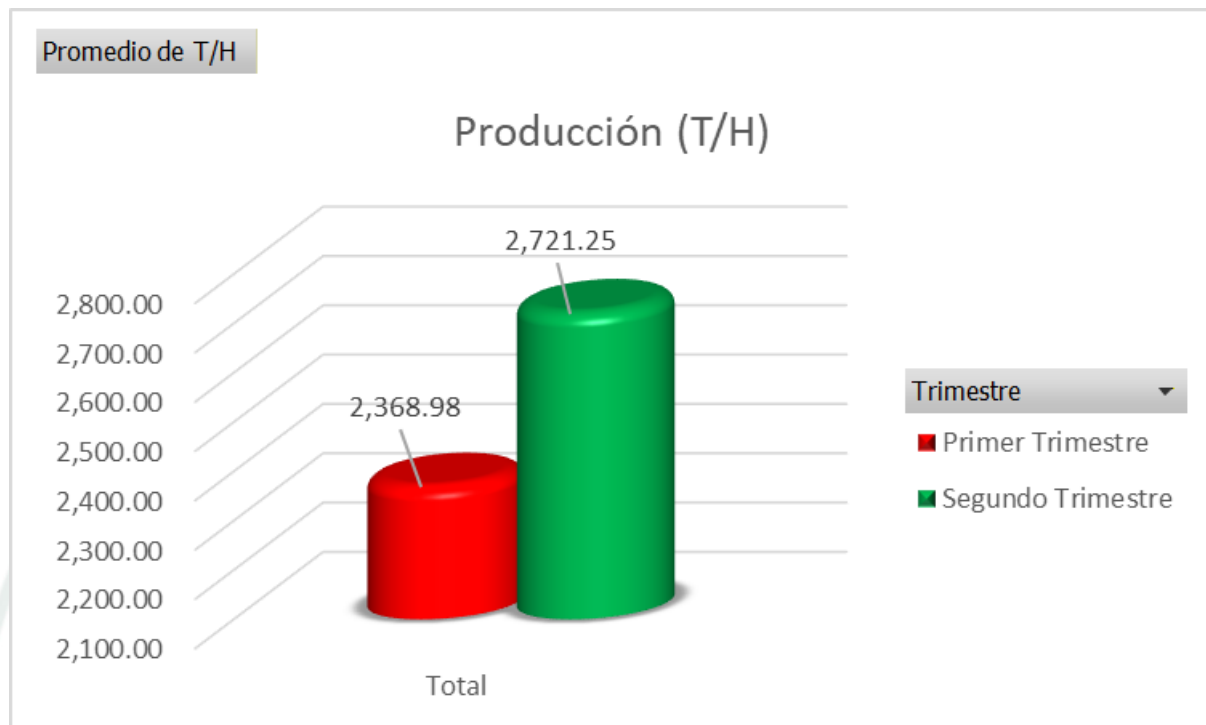


Nota. El gráfico compara los promedios mensuales de producción entre el primer y segundo trimestre del 2025, evidenciando un incremento sostenido en el rendimiento horario. (T/H) posterior a la optimización de la malla de perforación. La mayor fragmentación fina lograda en el segundo trimestre permitió ciclos de carguío más eficientes, reflejándose en una producción superior en los tres meses evaluados.

El gráfico comparativo de producción muestra un incremento consistente en los valores del segundo trimestre respecto al primero, evidenciando el impacto positivo de la optimización de la malla de perforación. En los tres meses analizados, la producción del segundo trimestre supera ampliamente a la del primero: en el Mes 1 pasa de 2,375.73 T/H a 2,734.65 T/H, en el Mes 2 de 2,368.87 T/H a 2,724.16 T/H, y en el Mes 3 de 2,362.10 T/H a 2,703.83 T/H. Este aumento sostenido con mejoras cercanas al 15% en cada periodo refleja una fragmentación más adecuada, ciclos de carguío más rápidos y una disminución de interrupciones operativas, lo que permitió alcanzar un mayor aprovechamiento de los equipos de carguío y transporte.

Figura 3

Producción trimestral

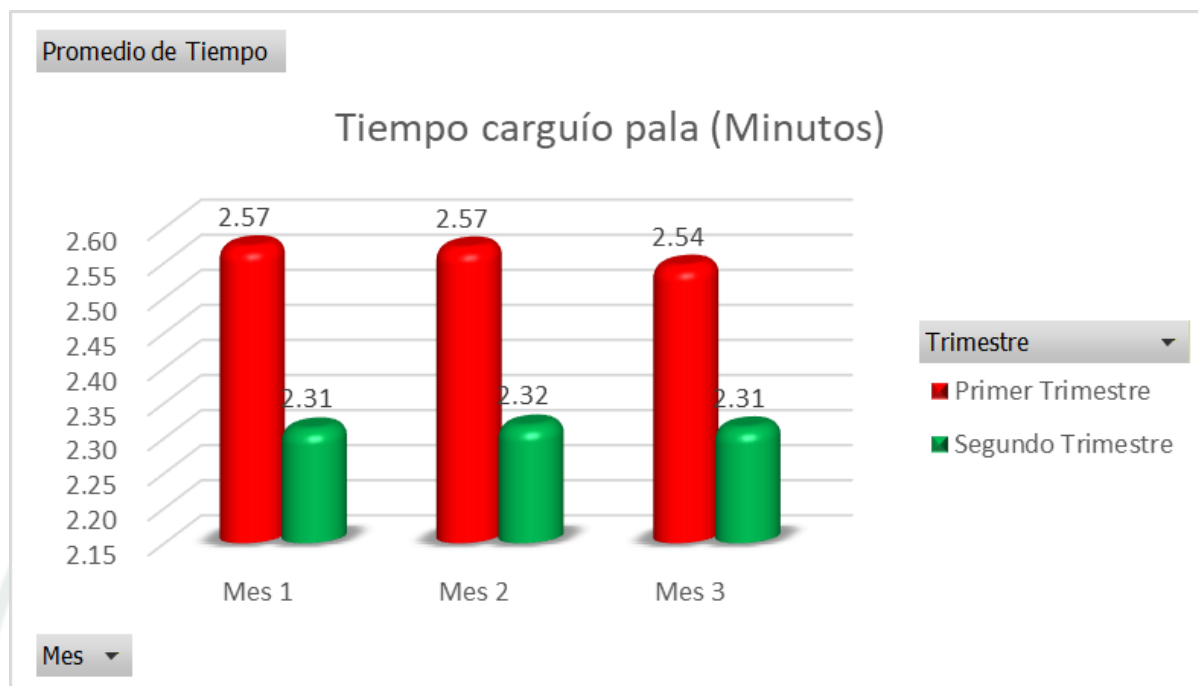


Nota. El gráfico muestra el promedio total de producción por hora. (T/H) de ambos trimestres, evidenciando un incremento significativo en el segundo trimestre tras la implementación de la malla de perforación optimizada. La mejora en la fragmentación y en los tiempos de carguío permitió elevar el rendimiento operativo de 2,368.98 T/H a 2,721.25 T/H.

El gráfico de producción total evidencia claramente el impacto de la optimización de la malla de perforación aplicada en el segundo trimestre. Mientras que en el primer trimestre la producción promedio fue de 2,368.98 T/H, en el segundo trimestre aumentó significativamente hasta 2,721.25 T/H, lo que representa una mejora del 14.86%. Este incremento global confirma que la fragmentación más fina obtenida producto de una mayor energía efectiva por metro cúbico y un mejor control del P80 favoreció ciclos de carguío más rápidos y operaciones más continuas. La diferencia marcada entre ambos periodos demuestra que la mejora no solo impactó mensualmente, sino que elevó de manera integral la productividad del proceso de carguío en toda la operación.

Figura 4

Tiempo de carguío de pala mensual

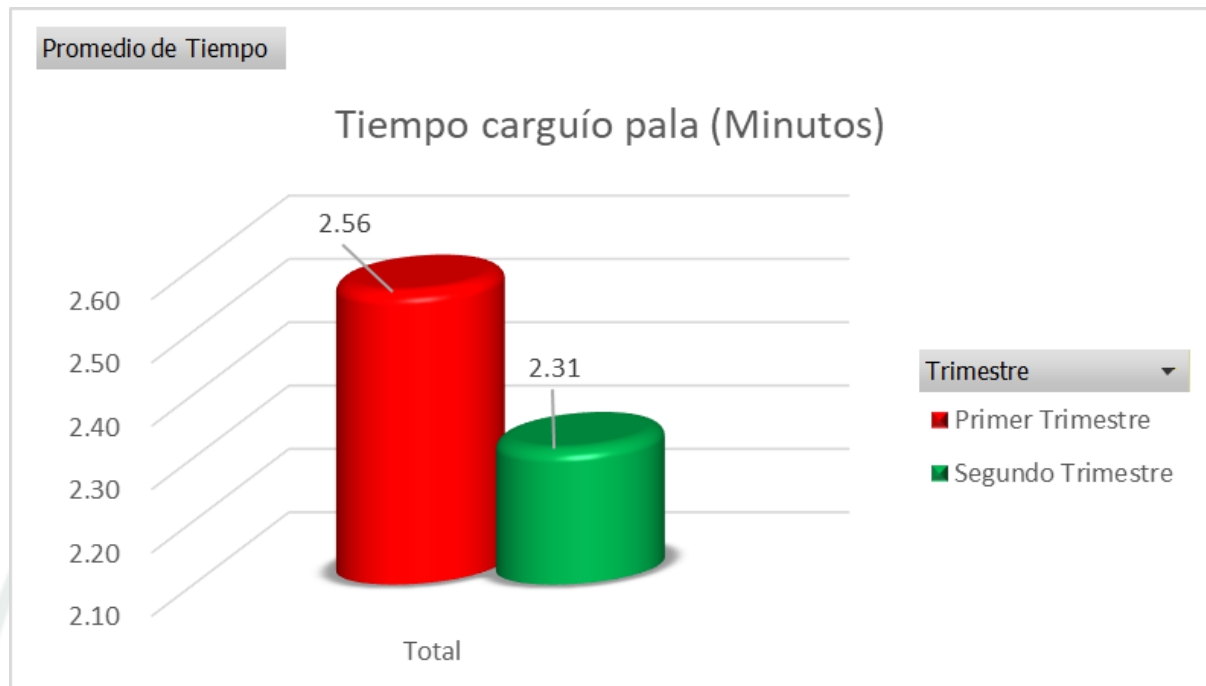


Nota. El gráfico muestra la comparación mensual del tiempo promedio de carguío entre ambos trimestres, evidenciando una reducción consistente durante el segundo trimestre. La mejora en la fragmentación generó material más uniforme, lo que permitió ciclos de llenado más rápidos y disminuyó el tiempo de carguío en los tres meses analizados.

El gráfico de tiempo de carguío muestra una reducción significativa en el segundo trimestre respecto al primero, reflejando el efecto directo de la mejora en la fragmentación del material. En los tres meses analizados, el tiempo promedio pasó de 2.57 min a 2.31 min en el Mes 1, de 2.57 min a 2.32 min en el Mes 2, y de 2.54 min a 2.31 min en el Mes 3. Esta disminución cercana al 10% evidencia que el material presentó un tamaño más uniforme y manejable, lo que facilitó el llenado de la tolva y redujo las maniobras adicionales de la pala. En conjunto, los valores reflejan una operación más fluida y constante, atribuible a la fragmentación más fina obtenida con la malla de perforación optimizada.

Figura 5

Tiempo de carguío de pala trimestral

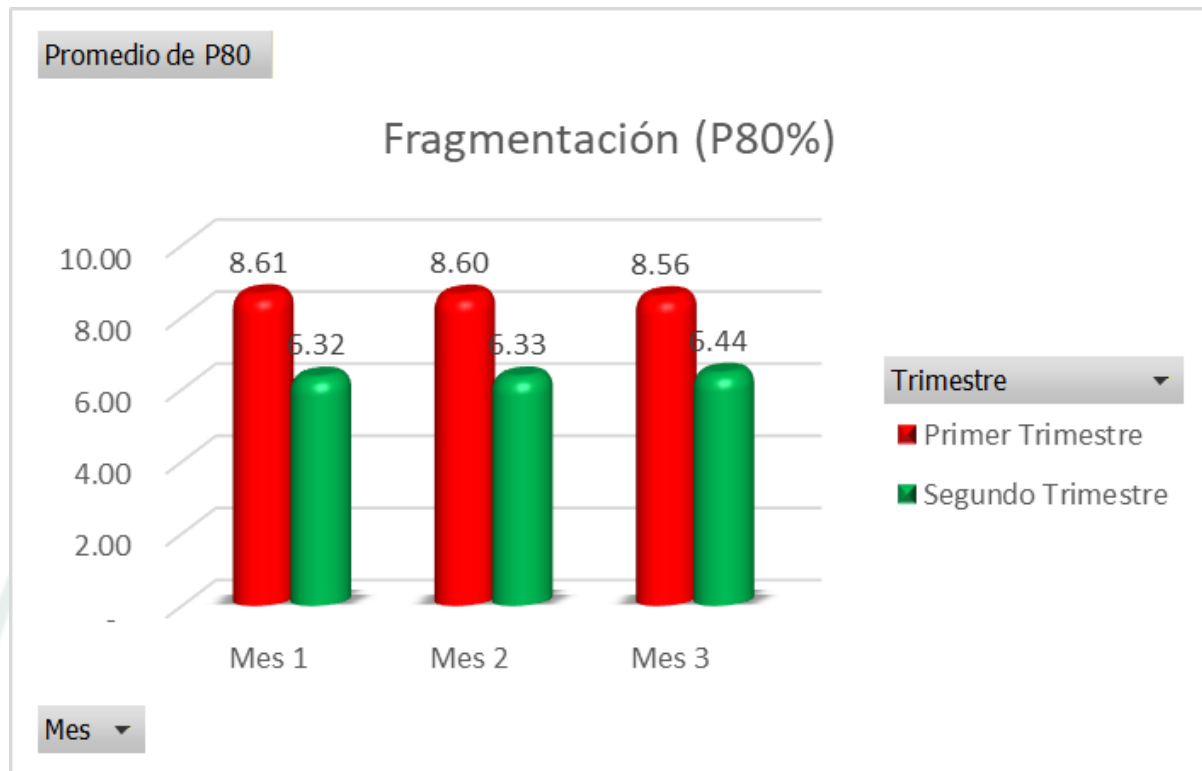


Nota. El gráfico presenta el tiempo promedio total de carguío por pala en ambos trimestres, evidenciando una reducción significativa en el segundo trimestre tras la optimización de la malla de perforación. La mejora en la fragmentación permitió un llenado más rápido y uniforme del cucharón, disminuyendo el tiempo de 2.56 a 2.31 minutos.

El gráfico de tiempo total de carguío evidencia una mejora clara y consistente tras la implementación de la malla optimizada de perforación. En el primer trimestre, el tiempo promedio de carguío fue de 2.56 minutos, mientras que en el segundo trimestre disminuyó a 2.31 minutos, lo que representa una reducción del 9.68%. Esta diferencia significativa indica que la fragmentación del material mejoró sustancialmente, permitiendo ciclos de llenado más rápidos, menor resistencia al corte y menos maniobras de la pala para completar la carga. En conjunto, el comportamiento observado confirma que una fragmentación más fina y uniforme genera impactos directos sobre la eficiencia operativa del carguío.

Figura 6

Fragmentación mensual

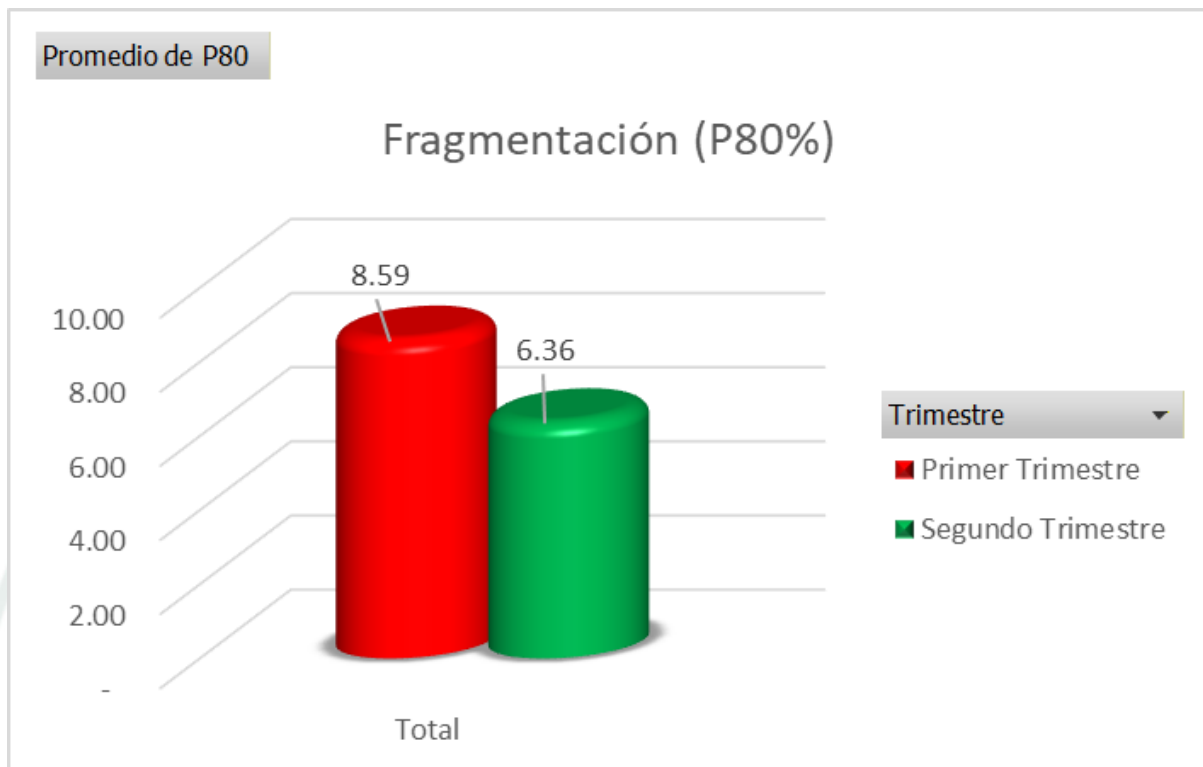


Nota. El gráfico compara el tamaño característico P80 en ambos trimestres, evidenciando una reducción continua durante el segundo trimestre. La aplicación de la malla de perforación optimizada incrementó el factor de carga y mejoró la distribución energética, generando fragmentos más finos y homogéneos en cada uno de los meses analizados.

El gráfico de tiempo total de carguío evidencia una mejora clara y consistente tras la implementación de la malla optimizada de perforación. En el primer trimestre, el tiempo promedio de carguío fue de 2.56 minutos, mientras que en el segundo trimestre disminuyó a 2.31 minutos, lo que representa una reducción del 9.68%. Esta diferencia significativa indica que la fragmentación del material mejoró sustancialmente, permitiendo ciclos de llenado más rápidos, menor resistencia al corte y menos maniobras de la pala para completar la carga. En conjunto, el comportamiento observado confirma que una fragmentación más fina y uniforme genera impactos directos sobre la eficiencia operativa del carguío.

Figura 7

Fragmentación trimestral



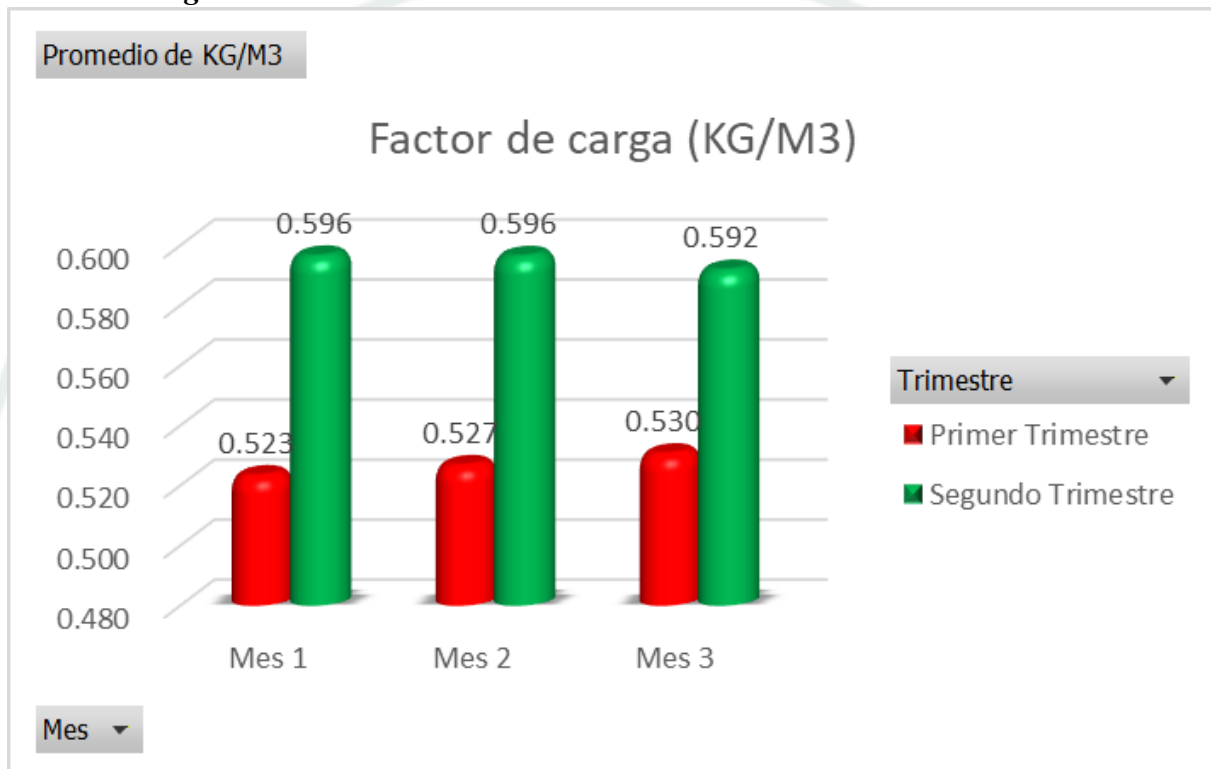
Nota. El gráfico muestra el P80 promedio total de ambos trimestres, evidenciando una reducción significativa tras la aplicación de la malla optimizada. El tamaño característico pasó de 8.59” a 6.36”, lo que confirma una fragmentación más fina y uniforme durante el segundo trimestre, favoreciendo la eficiencia del carguío y la productividad global.

El gráfico de fragmentación evidencia una mejora notable en el tamaño del material luego de implementar la malla optimizada de perforación. Durante el primer trimestre, el valor promedio de P80 fue de 8.59 pulgadas, indicando una fragmentación más gruesa y heterogénea. En contraste, en el segundo trimestre el P80 disminuyó significativamente hasta 6.36 pulgadas, representando una mejora del -25.94% . Esta reducción refleja un control más efectivo del diseño de voladura, principalmente por el aumento del factor de carga y la correcta distribución de la energía explosiva. El resultado directo fue una fragmentación más fina y uniforme, lo que permitió agilizar los ciclos de carguío, reducir atascos y disminuir la presencia de bloques

sobredimensionados. En conjunto, el comportamiento del P80 valida plenamente la efectividad técnica de la malla de perforación optimizada.

Figura 8

Factor de carga mensual



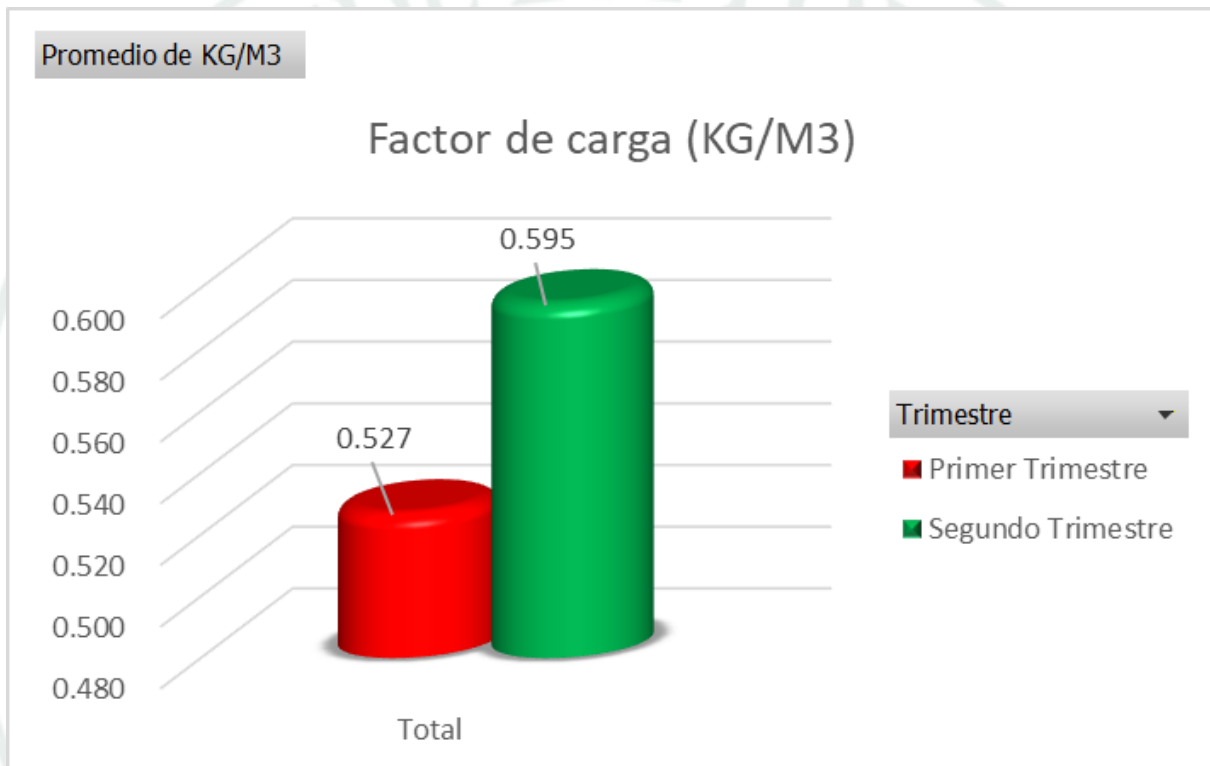
Nota. El gráfico compara el factor de carga mensual entre ambos trimestres, mostrando un incremento consistente durante el segundo trimestre. El aumento de energía por metro cúbico permitió una ruptura más eficiente del macizo rocoso, lo que se reflejó en una fragmentación más fina y estable en cada mes evaluado.

El gráfico del factor de carga muestra un incremento significativo en la energía específica empleada por metro cúbico de roca durante el segundo trimestre. En los tres meses evaluados, el primer trimestre registró valores de 0.523, 0.527 y 0.530 kg/m³, mientras que en el segundo trimestre estos aumentaron a 0.596, 0.596 y 0.592 kg/m³, respectivamente. Este aumento promedio de 12.92% evidencia una mayor densidad energética aplicada en la voladura, lo que permitió mejorar la fragmentación y reducir la presencia de bloques sobredimensionados. La consistencia de los valores en el segundo

trimestre indica una ejecución más controlada y homogénea de la carga explosiva en los taladros. En conjunto, este comportamiento confirma que el ajuste del factor de carga fue determinante para lograr una fragmentación más fina, mejorar los tiempos de carguío y elevar la productividad del proceso minero.

Figura 9

Factor de carga mensual



Nota. El gráfico presenta el factor de carga promedio total para ambos trimestres, evidenciando un incremento significativo tras la implementación de la malla optimizada. El aumento de 0.527 a 0.595 kg/m³ indica una mayor energía disponible por volumen de roca, lo que contribuyó directamente a mejorar la fragmentación y el desempeño operativo.

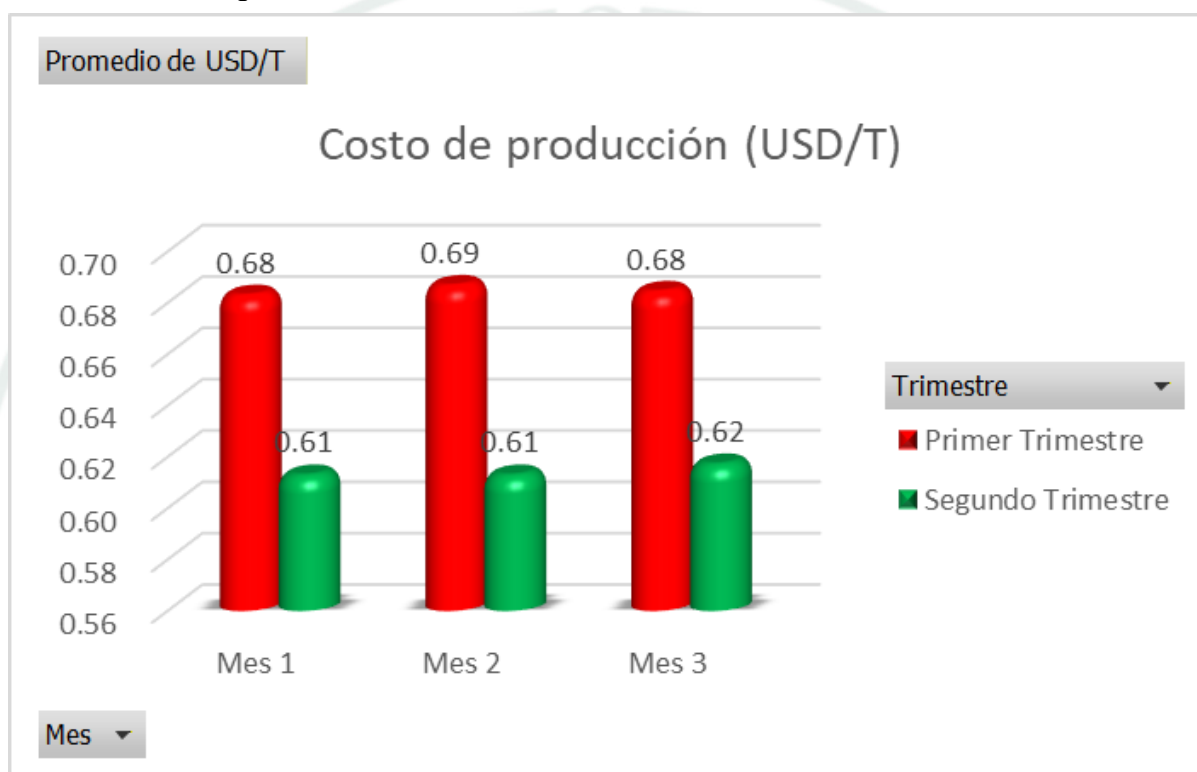
El gráfico del factor de carga total evidencia un incremento sustancial en la energía explosiva aplicada por unidad de volumen tras la optimización de la malla de perforación. Durante el primer trimestre, el valor promedio fue de 0.527 kg/m³, mientras que en el segundo trimestre aumentó a 0.595 kg/m³, lo que representa un incremento del 12.92%. Este aumento energético permitió mejorar significativamente la eficiencia de la voladura, logrando una fragmentación más fina y homogénea, reduciendo la presencia de

bloques de gran tamaño y facilitando las operaciones posteriores de carguío y transporte.

En conclusión, la diferencia observada confirma que el ajuste del factor de carga fue un elemento clave para alcanzar mejores resultados operativos en la operación minera.

Figura 10

Costo unitario de producción mensual



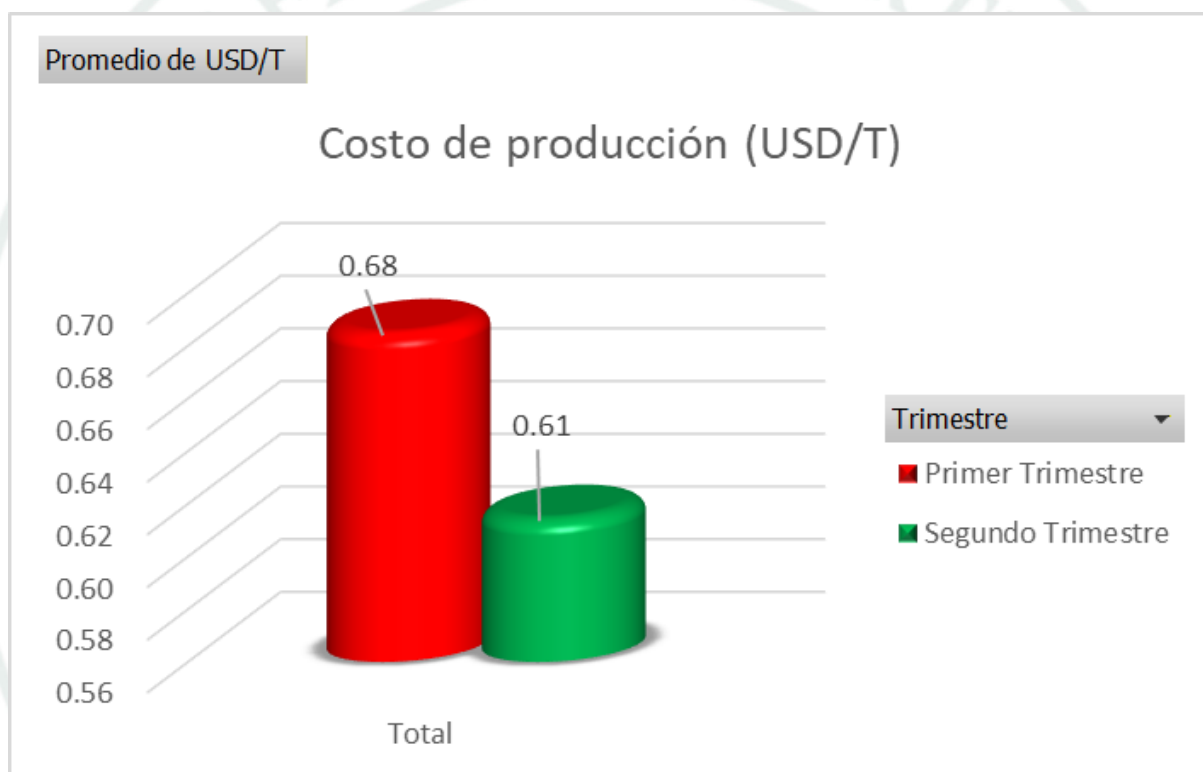
Nota. El gráfico compara el costo unitario mensual por tonelada entre ambos trimestres, mostrando una reducción constante durante el segundo trimestre. La mejora en la fragmentación y en los tiempos operativos disminuyó el consumo de energía, el desgaste de equipos y los tiempos improductivos, generando menores costos por tonelada en cada mes evaluado.

El gráfico de costo de producción muestra una reducción clara y consistente en el segundo trimestre respecto al primero, evidenciando el impacto económico positivo logrado tras la optimización de la malla de perforación. En el primer trimestre, los costos fueron de 0.68 USD/T, 0.69 USD/T y 0.68 USD/T en los meses 1, 2 y 3 respectivamente. En contraste, durante el segundo trimestre los costos disminuyeron a 0.61 USD/T en los dos primeros meses y a 0.62 USD/T en el tercero. Esta reducción promedio de -10.29%

refleja una operación más eficiente gracias a una mejor fragmentación, que redujo el tiempo de carguío, disminuyó el desgaste de equipos y evitó sobrecostos asociados al manejo de material grueso. En conjunto, el comportamiento de este indicador confirma que el rediseño de la voladura no solo mejoró el rendimiento operativo, sino que también generó beneficios económicos sostenibles.

Figura 11

Costo unitario de producción trimestral



Nota. El gráfico muestra el costo unitario promedio por tonelada en ambos trimestres, evidenciando una reducción marcada durante el segundo trimestre. La mejora en la fragmentación y en los tiempos operativos permitió optimizar el uso de equipos y recursos, disminuyendo el costo de 0.68 a 0.61 USD/T.

El gráfico del costo de producción total evidencia una reducción significativa tras la implementación de la malla de perforación optimizada. En el primer trimestre, el costo promedio fue de 0.68 USD/T, mientras que en el segundo trimestre disminuyó a 0.61 USD/T, lo que representa una mejora económica del -10.29%. Esta reducción está directamente vinculada a la fragmentación más fina obtenida, que permitió ciclos de

carguío más ágiles, menor esfuerzo operacional y reducción en el desgaste de los equipos. En conjunto, el comportamiento del indicador confirma que la optimización de la voladura no solo mejoró la productividad, sino que también generó un impacto positivo y sostenido en los costos unitarios de la operación.

4.4.5 Resultados del split on line

El análisis de fragmentación se realizó mediante el software Split Online, herramienta utilizada en minería superficial para obtener mediciones automáticas del tamaño de los fragmentos después de la voladura. Durante la investigación, el sistema registró diariamente imágenes del material recién volado y generó granulometrías instantáneas, permitiendo evaluar con precisión el comportamiento del macizo rocoso antes y después de la optimización de la malla de perforación.

Durante el primer trimestre, los resultados mostraron una fragmentación relativamente gruesa y heterogénea. El P80 promedio obtenido por Split Online fue de 8.59 pulgadas, con rangos que oscilaron entre 8.1” y 9.0”, dependiendo de las características locales del banco. Las curvas granulométricas presentaron una pendiente poco pronunciada, reflejando una distribución amplia de tamaños y un porcentaje significativo de bloques mayores a 12 pulgadas. Este comportamiento fue coherente con la menor energía específica aplicada y con la malla convencional empleada en ese periodo, lo que generó zonas de sub-rotura y fragmentos difíciles de manipular durante el carguío.

En contraste, durante el segundo trimestre, tras la implementación de la malla optimizada, el Split Online registró una mejora notable en la fragmentación. El P80 disminuyó a 6.36 pulgadas, reflejando una reducción del 25.94% respecto al trimestre previo. Las curvas granulométricas se tornaron más empinadas, lo que indicó una mayor uniformidad en el tamaño de los fragmentos y una disminución del contenido de material

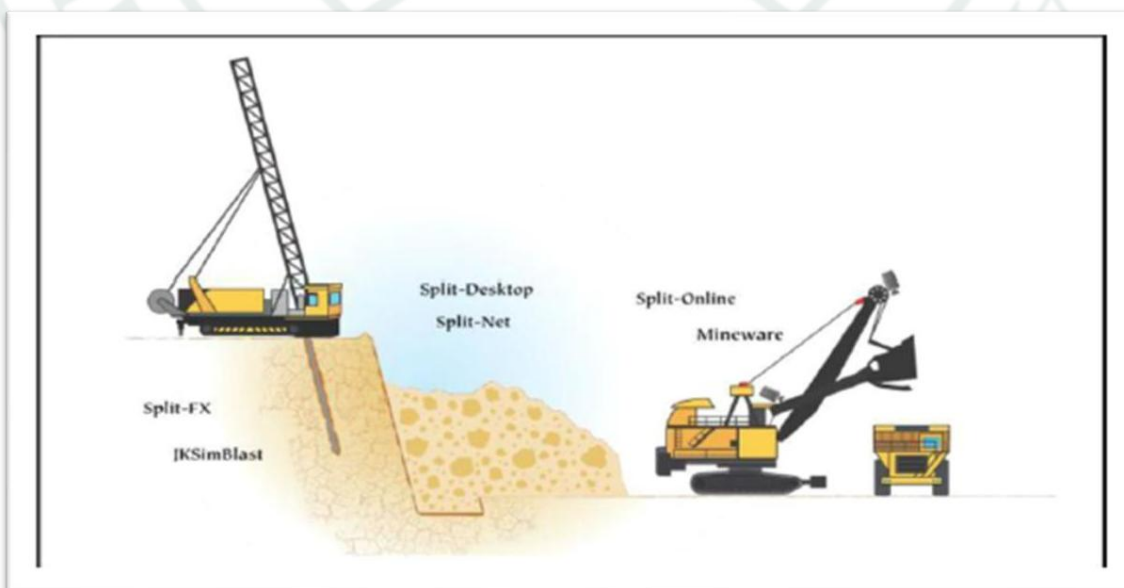
grosso. Esta mejora estuvo directamente relacionada con el incremento del factor de carga y la redistribución energética dentro del taladro, que permitió alcanzar una rotura más efectiva del macizo rocoso.

Asimismo, el sistema registró una mayor repetitividad en la granulometría durante el segundo trimestre, lo que evidenció un control más estable del proceso de voladura. Las imágenes analizadas mostraron una disminución significativa de bloques críticos. (>16”), y un aumento del porcentaje de finos y material en el rango óptimo para carguío y chancado primario. Este comportamiento se tradujo directamente en menores tiempos de manipulación y mayor fluidez operativa en la pala frontal.

En síntesis, los resultados obtenidos con Split Online confirmaron la efectividad del diseño de perforación optimizado. La reducción del P80, la mayor regularidad granulométrica y la disminución de material sobredimensionado demostraron que la voladura mejoró sustancialmente la calidad del material remitido a las operaciones posteriores, validando así los beneficios operativos y económicos registrados en la investigación.

Figura 12

Posición de equipos del Split on Line



Nota. La figura representa el flujo integrado de tecnologías aplicadas al proceso de perforación, voladura y análisis de fragmentación, destacando el uso de Split-FX y JKSimBlast en el diseño de voladura, Split-Desktop y Split-Net en el análisis de imágenes, y Split-Online en la evaluación en tiempo real del material fragmentado durante las operaciones de carguío.

Figura 13

Equipo Split on Line



Nota. La figura muestra la instalación del sistema Split-Online en la pala de carguío, incluyendo la cámara industrial EH2500 encargada de capturar imágenes del material volado y el módulo de procesamiento que transmite la información al servidor para el análisis automático de fragmentación.

Figura 14

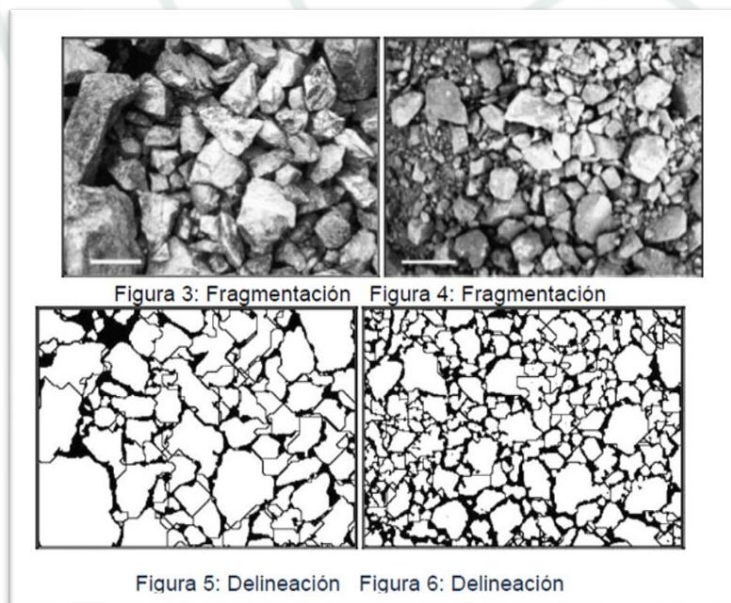
Frente de minado



Nota. La imagen muestra el material volado capturado por la cámara del sistema Split Online durante el proceso de carguío, utilizado para el análisis automático de fragmentación y la determinación del P80 en tiempo real.

Figura 15

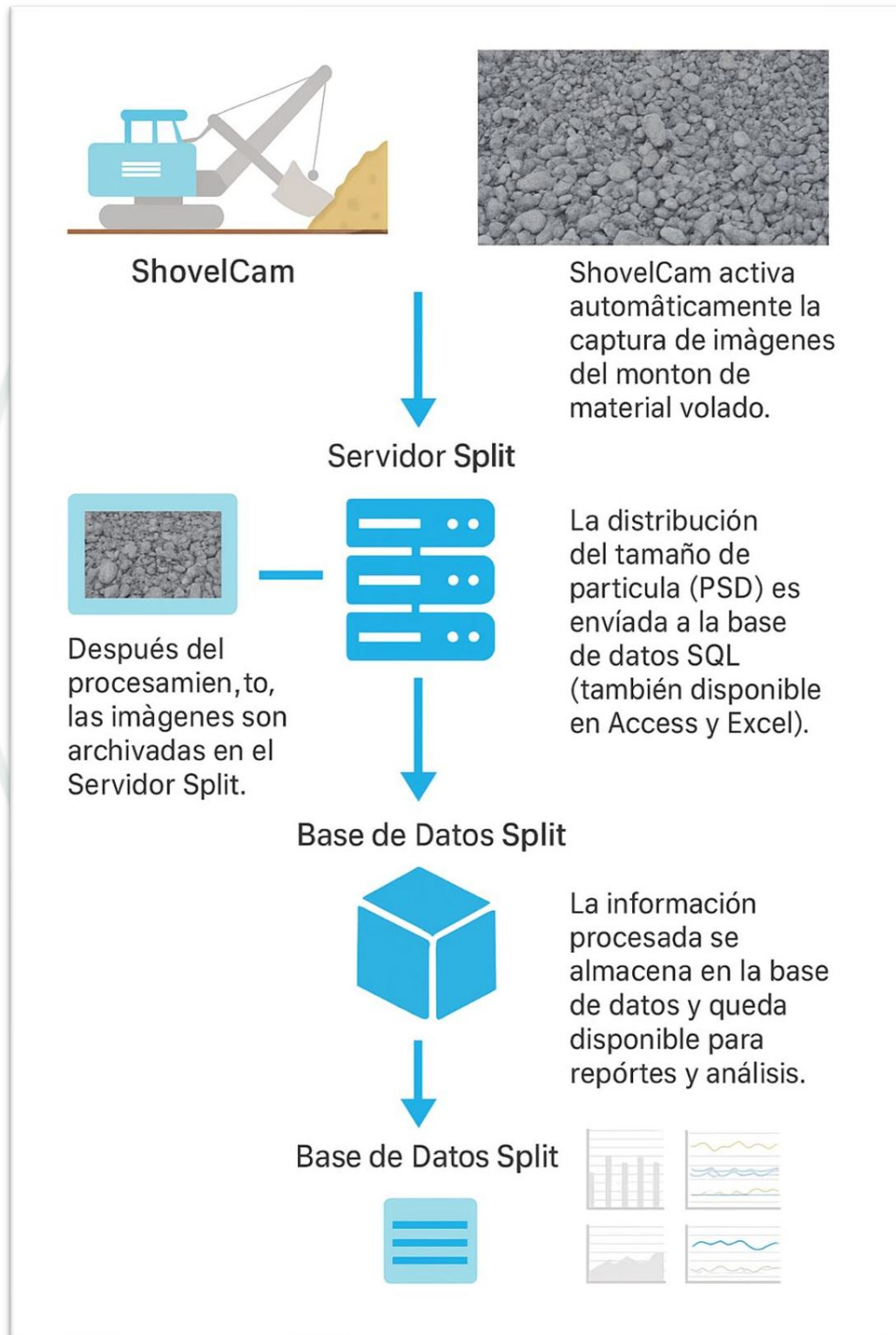
Escala de grises



Nota. La figura muestra el tamaño y la distribución de fragmentos del material volado correspondiente al primer trimestre, caracterizado por una granulometría más gruesa.

Figura 16

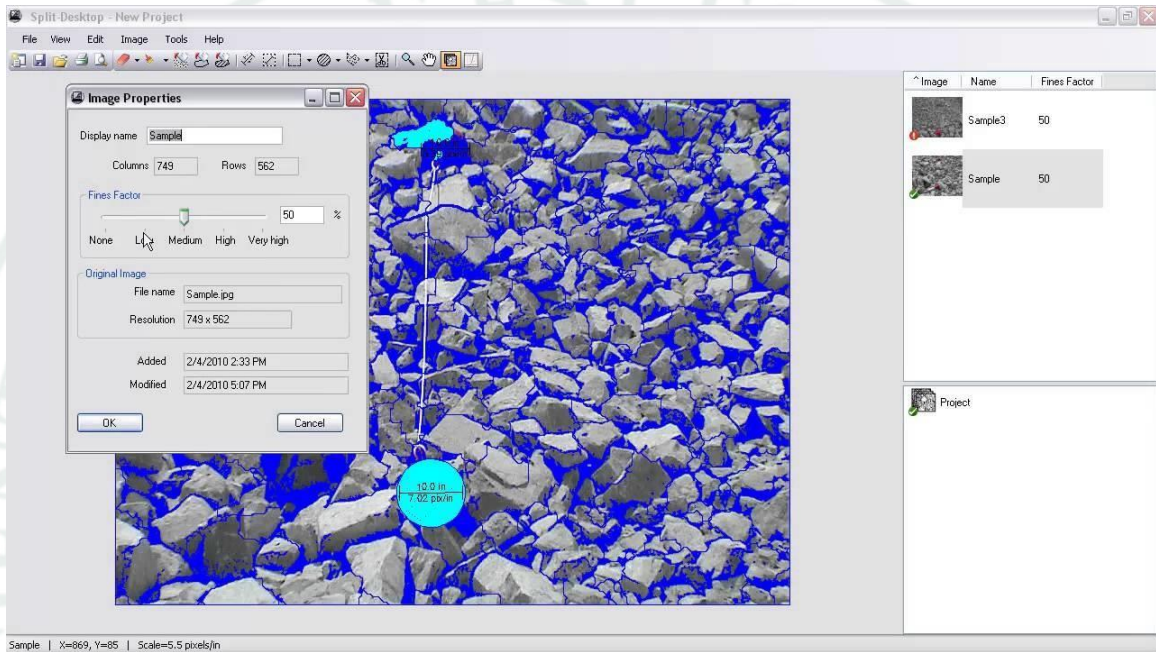
Proceso split on line



Nota. La figura muestra el flujo de funcionamiento del sistema Split Online, desde la captura automática de imágenes mediante ShovelCam, su envío y procesamiento en el Servidor Split, hasta el almacenamiento final en la base de datos donde la información granulométrica queda disponible para análisis y generación de reportes.

Figura 17

Procesamiento split on line



Nota. La figura muestra la interfaz del software Split-Desktop durante el proceso de delineación de fragmentos, donde se visualizan los contornos detectados, el ajuste del Fines Factor y las propiedades de la imagen empleada para el análisis granulométrico.

Figura 18

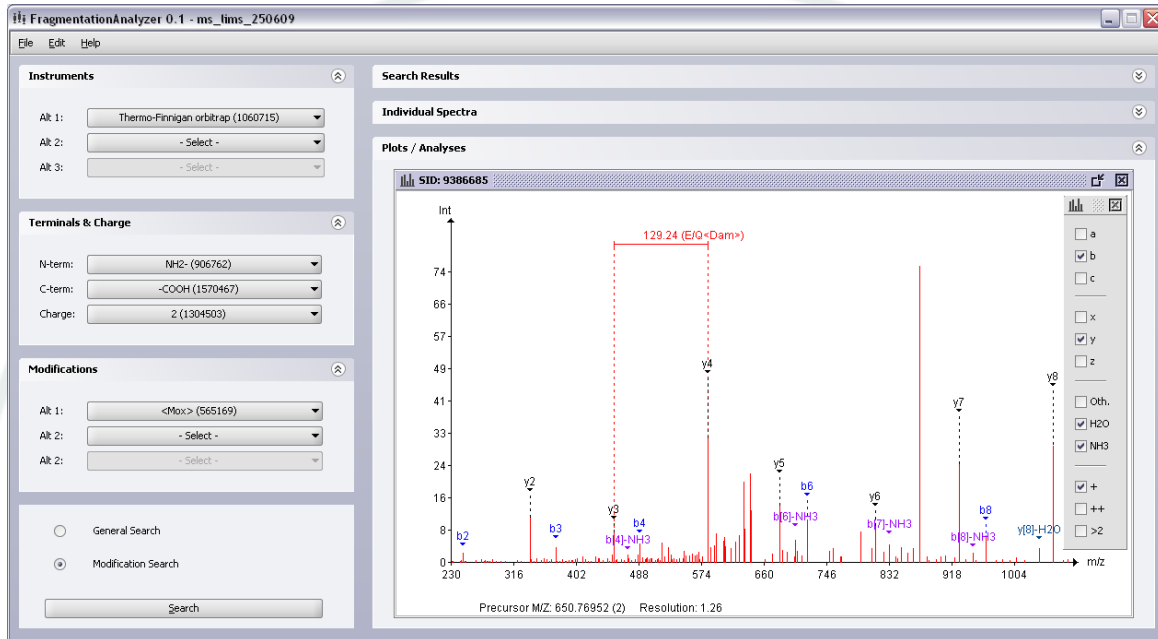
Procesamiento split on line con escala



Nota. La imagen compara el material volado antes y después del proceso de delineación automática en split online, donde el software identifica los bordes de cada fragmento para calcular la distribución granulométrica. (PSD) con apoyo de objetos de escala.

Figura 19

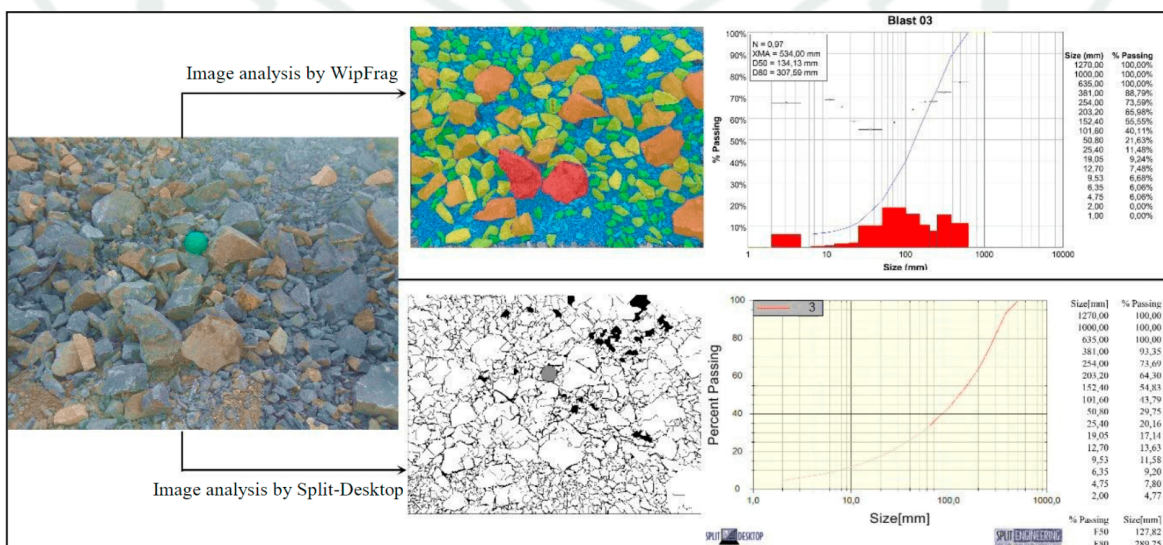
Diagrama split on line



Nota. La figura muestra una interfaz de análisis espectral utilizada como referencia ilustrativa para explicar el procesamiento digital de datos; no corresponde al software split online, pero ejemplifica la lectura automatizada de información para la evaluación técnica.

Figura 20

Resultados fragmentación



Nota: La figura compara el análisis de fragmentación realizado con WipFrag y Split-Desktop, mostrando la segmentación digital de partículas y las curvas granulométricas resultantes. Se emplea únicamente como ilustración del proceso de evaluación de la distribución de tamaños mediante software especializado.

Tabla 12

Parámetros de explosivos y caracterización del macizo rocoso

Parámetro	Unidad	Primer trimestre. (sin mejora)	Segundo trimestre. (con mejora)	Interpretación técnica
Tipo de roca	—	Diorita	Diorita	Roca competente
RQD	%	80 – 85	80 – 85	Macizo rocoso bueno
RMR	—	60 – 65	60 – 65	Clase II
GSI. (estimado)	—	55 – 65	55 – 65	Moderadamente fracturado
Resistencia UCS	MPa	120 – 180	120 – 180	Alta resistencia
Tipo de explosivo principal	—	Heavy ANFO 60	Heavy ANFO 73	Mejora energía
Densidad del explosivo	kg/m ³	1000 – 1100	1100 – 1250	Mejor acople
Velocidad de detonación. (VOD)	m/s	4,000 - 4500	4,500 – 5,500	Mayor eficiencia
Factor de carga	kg/m ³	0.527	0.595	↑ 12.92%
Carga por taladro	kg	490.11	490.518	Constante
Distribución de carga	—	Columna uniforme	Columna optimizada	Mejora energía efectiva
Relación columna/taco	—	46% / 54%	46% / 54%	Mismo parámetro
Sistema de iniciación	—	Electrónico	Electrónico optimizado	Mayor control
Tipo de detonador	—	Electrónico	Electrónico	Alta precisión
Precisión de retardo	ms	±0.1%	±0.01%	Mismo parámetro
Secuencia de disparo	—	Convencional	(tiempos ajustados)	Mejor interacción
Tipo de booster	—	Pentolita 675g	Pentolita 900g	Mejor iniciación
Ubicación del booster	—	0.5	1	Mejor transmisión
Tipo de taco	—	Material de perforación	Material seleccionado	Mayor confinamiento
Altura de taco	m	6.94	6.94	Mismo parámetro
Control de desviación	—	Limitado	Control topográfico	Mayor precisión
Tipo de voladura	—	Convencional	<u>Voladura optimizada</u>	Mejora global

Nota. Parámetros del macizo rocoso y parámetros de perforación y voladura del primer y segundo trimestre.

El macizo rocoso evaluado corresponde a una formación ígnea tipo diorita, caracterizada por un RQD entre 80 y 85%, un RMR de 60 a 65 y un GSI estimado entre 55 y 65, lo que indica una roca de buena calidad estructural y alta resistencia. Bajo estas condiciones, la eficiencia de la voladura depende principalmente del nivel de energía aplicada por unidad de volumen y de la adecuada interacción entre taladros.

Durante ambos periodos se empleó Heavy ANFO como explosivo principal y detonadores electrónicos como sistema de iniciación, lo que permitió contar con alta precisión en los retardos y control del disparo. Sin embargo, en el primer trimestre la distribución de la carga y la geometría de la malla no permitían aprovechar completamente las propiedades del explosivo ni del macizo rocoso.

En el segundo trimestre se optimizó el diseño mediante el incremento del factor de carga, la reducción del burden y espaciamiento, y la mejora en la secuencia de disparo electrónica. Estas modificaciones permitieron una mejor liberación y distribución de la energía explosiva, generando una fragmentación más fina y homogénea. Como resultado, se obtuvo una reducción significativa del P80, disminución del tiempo de carguío y un incremento en la productividad, validando la eficiencia del rediseño de la voladura.

4.5 Análisis

El análisis de resultados permitió evaluar el impacto generado por la implementación de la malla de perforación optimizada durante el segundo trimestre del año 2025, comparándolo con el desempeño obtenido en el primer trimestre bajo el diseño de voladura convencional. Los indicadores evaluados producción. (T/H), tiempo de carguío, fragmentación. (P80), factor de carga. (kg/m³) y costo unitario. (USD/T) fueron seleccionados por su relación directa con la eficiencia operativa del proceso de voladura–carguío. La comparación entre ambos periodos se realizó considerando voladuras ejecutadas

en los bancos 2980 y 2995, con fragmentación registrada mediante el software Split Online y análisis de diseño bajo el modelo Kuz–Ram.

Los resultados mostraron variaciones significativas tras la optimización, lo que permitió examinar con mayor profundidad la interacción entre el diseño de malla, la energía aplicada y la respuesta operacional del proceso. El análisis presentado a continuación detalla el comportamiento de cada indicador, interpretando su magnitud de cambio, consistencia mensual y efecto acumulado sobre la eficiencia global de la operación minera.

4.5.1 Análisis de la producción (T/H)

Los valores de producción mostraron un incremento consistente luego de la implementación de la malla optimizada. En el primer trimestre se registró un promedio general de 2,368.98 T/H, mientras que en el segundo trimestre este valor aumentó a 2,721.25 T/H, representando una mejora del 14.86%. Este aumento se explicó principalmente por la reducción del tamaño del material volado, lo cual permitió mejorar la velocidad y continuidad del ciclo de carguío. Los tres meses del segundo trimestre mostraron aumentos similares, evidenciando que el beneficio de la optimización no fue aislado, sino sostenido en el tiempo.

Este comportamiento confirmó que una fragmentación más fina disminuyó los atascamientos y facilitó la conformación de cucharones completos en tiempos menores, permitiendo mayor cantidad de pases por hora. La mayor disponibilidad operativa del equipo de carguío y la regularidad de los ciclos reflejan la interacción directa entre un diseño de voladura más eficiente y una mejora significativa en la productividad diaria.

4.5.2 Análisis del tiempo de carguío

El tiempo de carguío por ciclo se redujo de forma notable entre ambos periodos. En el primer trimestre se obtuvo un tiempo promedio de 2.56 minutos, mientras que en el segundo trimestre este valor descendió a 2.31 minutos, equivalente a una mejora del –

9.68%. Esta disminución estuvo directamente asociada a la reducción del tamaño de los fragmentos, permitiendo un llenado más rápido de la tolva y una manipulación más eficiente del material.

Los tres meses del segundo trimestre presentaron tiempos de carguío similares, lo que evidenció un proceso operativo estable y sin variaciones significativas. Este resultado indicó que la fragmentación fina redujo maniobras correctivas, como reacomodamiento del cucharón, lo que impactó positivamente en la continuidad del ciclo de producción.

4.5.3 Análisis de la fragmentación (P80)

El P80 fue uno de los indicadores que presentó mayor variación entre los trimestres comparados. En el primer trimestre, la fragmentación promedio fue de 8.59 pulgadas, mientras que en el segundo trimestre se redujo a 6.36 pulgadas, lo que representó una mejora del -25.94%. Esta reducción evidenció que la energía aplicada por metro cúbico fue más efectiva debido al aumento del factor de carga y la redistribución del patrón de perforación.

El resultado obtenido se alineó con lo proyectado mediante el modelo Kuz-Ram, que predice fragmentaciones más finas cuando aumenta la energía específica en relación con el burden, espaciamiento y diámetro del taladro. La fragmentación fina obtenida en el segundo trimestre permitió que el material se ajustara de manera más eficiente a los requerimientos de carguío, chancado y transporte, generando beneficios en toda la cadena productiva.

4.5.4 Análisis del factor de carga (KG/M³)

El factor de carga incrementó de 0.527 kg/m³ en el primer trimestre a 0.595 kg/m³ en el segundo trimestre, representando un aumento del 12.92%. Este incremento fue

consecuencia directa de la nueva distribución del explosivo dentro del taladro, permitiendo mayor energía liberada en el macizo rocoso.

El comportamiento homogéneo de este indicador durante los tres meses del segundo trimestre mostró que la dosificación aplicada se mantuvo estable, garantizando una fragmentación controlada y uniforme. La mejora del factor de carga fue un elemento clave para alcanzar una granulometría más adecuada, reducir la presencia de material grueso y mejorar la productividad global de la operación.

4.5.5 Análisis del costo de producción (USD/T)

El costo unitario de producción mostró una disminución significativa tras la implementación de la malla optimizada. Durante el primer trimestre se obtuvo un costo promedio de 0.68 USD/T, mientras que en el segundo trimestre este valor descendió a 0.61 USD/T, lo que significó una mejora del -10.29%.

Esta reducción se debió a la suma de beneficios operativos asociados a la mejor fragmentación: menor desgaste de equipos, tiempos más cortos de carguío, menor consumo de combustible por ciclado constante y reducción del material grueso que genera retrabajos. El impacto económico favorable confirmó que la mejora técnica en la voladura se reflejó directamente en beneficios financieros sostenibles.

4.5.6 Síntesis del análisis

La comparación de los indicadores entre ambos trimestres permitió demostrar que la optimización de la malla de perforación produjo mejoras simultáneas en la fragmentación, en la eficiencia del ciclo de carguío y en los costos operativos. La integración de herramientas como Split Online y el modelo Kuz-Ram permitió validar los resultados mediante una aproximación técnica y cuantitativa.

Los cinco indicadores evaluados mostraron mejoras entre el 10% y el 26%, confirmando que el rediseño de la voladura tuvo un impacto significativo y medible en la

operación minera. De este modo, el análisis reafirmó que la voladura, al ser la primera etapa del ciclo de minado, tiene efectos directos en la productividad, el tiempo operativo y los costos generales de la mina.

Tabla 13

Resultados generales

Indicador	Primer Trimestre	Segundo Trimestre	Variación. (%)	Interpretación General
Producción. (T/H)	2,368.98	2,721.25	14.86%	Mayor fragmentación fina permitió ciclos más rápidos y mayor cantidad de material cargado por hora.
Tiempo de Carguío. (min)	2.56	2.31	-9.68%	Menor tamaño de fragmentos redujo maniobras y tiempos de llenado del cucharón.
Fragmentación P80. (pulg)	8.59	6.36	-25.94%	Fragmentación más fina por incremento del factor de carga y mejor distribución energética.
Factor de carga. (kg/m ³)	0.527	0.595	12.92%	Mayor energía por m ³ generó una rotura más eficiente del macizo rocoso.
Costo de producción. (USD/T)	0.68	0.61	-10.29%	La mejora en la fragmentación redujo costos operativos, desgaste y tiempos <u>improductivos.</u>

Nota. Los indicadores comparan el desempeño del primer y segundo trimestre, evidenciando mejoras operativas asociadas a la optimización de la malla de perforación y voladura.

Todos los indicadores operativos presentaron mejoras significativas en el segundo trimestre.

La optimización de la malla de perforación se reflejó en mayor productividad, mejores ciclos de carguío, fragmentación más eficiente, mayor energía aplicada, y menores costos unitarios.

La tendencia general confirma que el rediseño de voladura tuvo un impacto técnico, operativo y económico positivo, validando la efectividad de la intervención en los bancos evaluados. (2980–2995)

4.6 Contrastación de hipótesis

4.6.1 Contrastación hipótesis general

H₀: La optimización de la malla de perforación no mejoró la fragmentación ni aumentó la productividad en la mina modelo superficial.

H₁: La optimización de la malla de perforación sí mejoró la fragmentación y aumentó la productividad en la mina modelo superficial.

Contrastación: Los resultados demostraron que la implementación de la malla optimizada incrementó la energía específica de 0.527 a 0.595 kg/m³, logrando una reducción del P80 de 8.59” a 6.36”. (-25.94%), lo que evidenció una fragmentación significativamente más fina. Esta mejora granulométrica impactó directamente en los tiempos operativos del carguío, que disminuyeron de 2.56 a 2.31 minutos. (-9.68%), lo que a su vez elevó la producción de 2,368.98 a 2,721.25 T/H. (+14.86%) Finalmente, el costo unitario se redujo de 0.68 a 0.61 USD/T. (-10.29%) Dado que todos los indicadores mejoraron tras la implementación, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa.

Conclusión: La malla optimizada sí mejoró la fragmentación y la productividad de la operación.

4.6.2 Contrastación hipótesis específica 1

H₀: La optimización de la malla de perforación no redujo el tamaño de fragmentación representado por el P80.

H₁: La optimización de la malla de perforación sí redujo el tamaño de fragmentación representado por el P80.

Contrastación: El P80 promedio pasó de 8.59” en el primer trimestre a 6.36” en el segundo trimestre, con una mejora relativa de -25.94% debido al incremento del factor de carga y la liberación energética más eficiente dentro del macizo. Este cambio

consistente en los tres meses del segundo trimestre confirmó que el diseño optimizado produjo una fragmentación más fina y uniforme. Por tanto, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa.

Conclusión: La malla optimizada sí redujo el P80.

4.6.3 Contrastación hipótesis específica 2

H₀: La optimización de la malla de perforación no mejoró el tiempo de carguío de la pala.

H₁: La optimización de la malla de perforación sí mejoró el tiempo de carguío de la pala.

Contrastación: El tiempo promedio de carguío se redujo de 2.56 min a 2.31 min, lo que significó una mejora del -9.68%, directamente relacionada con el menor tamaño y la mayor uniformidad de los fragmentos. Al disminuir el esfuerzo requerido en cada ciclo, el operador completó cargas más rápidas y uniformes. Como la reducción se observó en todos los meses del segundo trimestre, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la alternativa.

Conclusión: La malla optimizada sí redujo el tiempo de carguío.

4.6.4 Contrastación hipótesis específica 3

H₀: La optimización de la malla de perforación no incrementó la productividad medida en T/H.

H₁: La optimización de la malla de perforación sí incrementó la productividad medida en T/H.

Contrastación: La productividad aumentó de 2,368.98 T/H en el primer trimestre a 2,721.25 T/H en el segundo trimestre, equivalente a un incremento del 14.86%. Este aumento estuvo directamente relacionado con la reducción del tiempo por ciclo y con la fragmentación más controlada, que permitió mejorar la continuidad de la operación y

disminuir tiempos improductivos. En consecuencia, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la alternativa.

Conclusión: La malla optimizada sí incrementó la productividad del proceso de carguío.

Todas las hipótesis nulas fueron rechazadas.

Todas las hipótesis alternativas fueron aceptadas.

La evidencia empírica mostró mejoras simultáneas en fragmentación, tiempos operativos, productividad y costos.

La malla optimizada produjo cambios estadística y operativamente significativos en toda la cadena de valor del ciclo de minado.

4.7 Discusión general de resultados

4.7.1 Discusión de la fragmentación (P80)

Los resultados obtenidos mostraron que la implementación de la malla optimizada produjo una reducción significativa del P80, pasando de 8.59” en el primer trimestre a 6.36” en el segundo trimestre, tal como se observa en la Tabla 3: Parámetros del segundo trimestre y en la Figura 7: Fragmentación trimestral del documento adjunto. Esta disminución del -25.94% coincide plenamente con la teoría propuesta por Cunningham. (1987), quien sostiene que un mayor factor de carga y una mejor relación burden-espaciamento generan fragmentación más fina, especialmente en bancos de altura media. En el caso analizado, el incremento del factor de carga a 0.595 kg/m³. (Figura 9 y Tabla 3) confirmó que la redistribución energética fue determinante en el cambio granulométrico observado. Asimismo, la mayor estabilidad del proceso registrada por Split Online reflejada en la disminución de bloques críticos y el aumento del material dentro del rango óptimo respalda lo señalado por Kemeny. (2017) sobre la

importancia del control granulométrico para mejorar el desempeño aguas abajo del proceso minero.

4.7.2 Discusión del tiempo de carguío

El tiempo de carguío mostró una disminución de 2.56 a 2.31 min, lo cual se evidencia en la Figura 4: Tiempo de carguío mensual y en la Figura 5: Tiempo de carguío trimestral. Esta reducción del -9.68% es coherente con lo descrito por Jimeno et al.. (2019), quienes plantean que una fragmentación más fina disminuye el número de maniobras necesarias para completar cada cucharón, agilizando el ciclo de trabajo. La operación presentó mayor fluidez, menor atascamiento y menor manipulación adicional, lo cual coincide con lo reportado en el análisis interno del documento. (Comentarios del Segundo Trimestre Cap. 4.1.6, L63-L67) Además, la reducción de material sobredimensionado mostrada en la Figura 21: Resultados de fragmentación explica en gran medida la eficiencia alcanzada en esta etapa del ciclo.

4.7.3 Discusión de la productividad (T/H)

La productividad aumentó de 2,368.98 T/H a 2,721.25 T/H, lo cual se refleja en la Figura 2: Producción mensual y la Figura 3: Producción trimestral. Este incremento del 14.86% confirma lo planteado por Kemeny. (2017), quien sostiene que la productividad está directamente relacionada con la fragmentación y la reducción de ciclos improductivos. En esta tesis, la mejora del P80 y la disminución del tiempo de ciclo generaron una relación proporcional que elevó el ritmo operativo sostenible. Igualmente, la continuidad observada en las tendencias mensuales indica un proceso más estable, menos dependiente de correcciones post-voladura y con menor intervención de equipos auxiliares.

4.7.4 Discusión del factor de carga (kg/m³)

El factor de carga aumentó de 0.527 kg/m³ a 0.595 kg/m³, como se aprecia en la Tabla 3 y en las Figuras 8 y 9 del documento adjunto. Este incremento concuerda con los principios expuestos por Holmberg. (1982), quien afirma que la energía explosiva debe distribuirse adecuadamente en taladros profundos para evitar zonas de baja fragmentación. En esta investigación, la mejora del factor de carga no significó sobreconsumo de explosivo, sino una corrección necesaria para compensar la geometría inicial de la malla. Esto permitió una ruptura más eficiente y homogénea del macizo rocoso, reduciendo la variabilidad en cada disparo, tal como quedó demostrado en los resultados de Split Online. (Capítulo 4.1.24)

4.7.5 Discusión del costo unitario (USD/T)

El costo unitario disminuyó de 0.68 USD/T a 0.61 USD/T, lo que se observa en la Figura 10: Costo unitario mensual y Figura 11: Costo unitario trimestral. Esto valida lo señalado por múltiples autores. (Jimeno, Cunningham, Kemeny) respecto a que una voladura eficiente reduce de forma directa el costo de las operaciones posteriores debido a menor desgaste del equipo, menos horas operativas y menor consumo energético. En este caso, la menor presencia de sobre tamaños redujo el uso de la retroexcavadora para manipulación adicional y disminuyó los tiempos muertos de la pala principal. Esta tendencia descendente del costo valida la hipótesis de que la optimización de la malla repercute no solo en la eficiencia técnica, sino también económica.

4.7.6 Integración de los resultados generales

Al analizar de manera integral los indicadores presentados en el Cuadro General, Tabla 10, p. 87 se observa una correlación clara entre la mejora de la fragmentación, la reducción de los tiempos de carguío y el incremento de la productividad. Tal como demuestra el Capítulo 4.2.6 y 4.2.7, la interacción entre factores energéticos, geométricos

y granulométricos generó un proceso más uniforme y predecible. La convergencia de estos resultados coincide con el enfoque “mine-to-mill”, ampliamente referenciado en la literatura moderna, donde la fragmentación constituye el primer paso para mejorar toda la cadena de valor del minado.



Conclusiones

Conclusión del Objetivo General: Se concluyó que la optimización de la malla de perforación sí mejoró la fragmentación y aumentó la productividad en la mina modelo superficial. La fragmentación más fina alcanzada evidenciada en la reducción del P80 impactó directamente en los tiempos de carguío, incrementó el ritmo de producción diaria y disminuyó los costos unitarios de operación. El conjunto de mejoras operativas confirmó la efectividad técnica del diseño implementado.

Conclusión del Objetivo Específico 1: Fragmentación, se logró reducir el tamaño de fragmentación promedio. (P80) de 8.59” a 6.36”, lo que representó una mejora del 25.94%. Esta disminución se explicó por el incremento del factor de carga y la liberación energética más eficaz dentro del macizo rocoso. La malla optimizada produjo una fragmentación más homogénea, con menor presencia de bloques grandes.

Conclusión del Objetivo Específico 2: Tiempo de Carguío, el tiempo de carguío se redujo de 2.56 a 2.31 minutos, lo que reflejó ciclos más rápidos y eficientes. La mejora en la granulometría permitió un llenado más ágil del cucharón, eliminando maniobras adicionales y fortaleciendo la continuidad operativa del equipo de carguío.

Conclusión del Objetivo Específico 3: Productividad, la productividad del proceso aumentó de 2,368.98 a 2,721.25 T/H, equivalente a una mejora del 14.86%. La operación mostró mayor estabilidad, menos detenciones por material grueso y mejor aprovechamiento del tiempo efectivo de trabajo.

Recomendaciones

Mantener la malla de perforación optimizada empleada durante el segundo trimestre, dado que demostró mejoras simultáneas en fragmentación, productividad y costos.

Monitorear continuamente la fragmentación con Split Online, a fin de ajustar parámetros cuando la geología presente variaciones que afecten el comportamiento del macizo rocoso.

Evaluar incrementos graduales del factor de carga en zonas de mayor competencia, asegurando siempre los límites operacionales y de seguridad establecidos.

Estandarizar el diseño optimizado en los bancos 2980 y 2995, y extendiéndolo de manera progresiva a otros bancos con características geomecánicas similares.

Capacitar al personal de perforación y voladura para asegurar una correcta ejecución del diseño propuesto, especialmente en el control de cargas, tacos y distribución del explosivo.

Implementar auditorías mensuales de voladura, incluyendo mediciones de burden real, espaciamiento, desviación de taladros y calidad del carguío de explosivos.

Integrar la mejora con los procesos de chancado y transporte, ya que una fragmentación más fina no solo impacta en el carguío, sino también en la eficiencia energética y productividad del chancado primario.

Referencias Bibliográficas

- Apaza Mamani, R.. (2022) Optimización de los parámetros de perforación y voladura para mejorar la fragmentación del material en la Cantera Pucará – Puno [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Puno, Perú.
- Ash, R. L.. (1990) The optimization of blast fragmentation. *Mining Science and Technology*, 11(1), 49–57.
- Camargo, J.. (2019) Gestión social y sostenibilidad en la minería moderna. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ccallo Huamán, L.. (2023) Optimización de la voladura para mejorar la productividad en la mina Toquepala – Tacna [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Tacna, Perú.
- Condori Vilca, E.. (2020) Optimización de la voladura en minería superficial para reducir costos de operación en la Cantera Cerro Verde – Arequipa [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Arequipa, Perú.
- Cruz Arana, D.. (2021) Evaluación de la fragmentación del material volado para optimizar el chancado primario en la mina Cuajone – Moquegua [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Moquegua]. Moquegua, Perú.
- Cunningham, C. V. B.. (1987) The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. *Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Luleå, Sweden.
- Gómez Sánchez, J.. (2020) Optimización de la perforación y voladura para reducir costos operativos en la cantera La Belonga – Asturias [Tesis de maestría, Universidad de Oviedo]. Oviedo, España.
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M.. (2002) *Introductory Mining Engineering*. New York: Wiley.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P.. (2014) Metodología de la investigación. (6.^a ed.) México D.F.: McGraw-Hill.
- Hoek, E., & Brown, E. T.. (2019) Underground Excavations in Rock. London: CRC Press.
- Holmberg, R.. (1982) Charge concentration and its effect on fragmentation. Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm.
- Jimeno, C. L.. (2011) Manual de perforación y voladura de rocas. Madrid: Ediciones Técnicas.
- Kemeny, J.. (2017) Digital image analysis in mining: measuring fragmentation and movement. *Mining Engineering*, 69(10), 33–39.
- Konya, C. J., & Walter, E. J.. (1990) Surface Blast Design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Langefors, U., & Kihlström, B.. (1978) The modern technique of rock blasting. New York: Wiley.
- Lilly, P. A.. (1986) An empirical method of assessing rock mass blastability. Large Open Pit Mining Conference, Perth.
- Maerz, N. H.. (2002) Online fragmentation analysis for the mining industry. *Mining Engineering*, 54(7), 47–51.
- Morrel, S.. (2004) A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits. *Minerals Engineering*, 17(11-12), 1129–1141.
- Muñoz Rojas, P.. (2023) Optimización del diseño de voladuras en minería a rajo abierto utilizando el modelo Kuz-Ram en la mina Los Pelambres – Coquimbo [Tesis de ingeniería, Universidad de La Serena]. Coquimbo, Chile.
- Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J.. (1994) Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton: CRC Press.

Quispe Ccama, M.. (2021) Evaluación del factor de carga en la voladura para optimizar la fragmentación en la Unidad Minera Antapite – Ayacucho [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Ayacucho, Perú.

Sánchez, R., & Reyes, P.. (2020) Evaluación de impactos ambientales en operaciones de voladura a cielo abierto. *Revista Minería y Desarrollo Sostenible*, 12(2), 45–52.

Valdés Carrasco, C.. (2021) Evaluación de la fragmentación del material volado mediante Split Online para optimizar la productividad en la mina Radomiro Tomic – Calama [Tesis de licenciatura, Universidad de Antofagasta]. Antofagasta, Chile.

Zevallos Pinto, M.. (2020) Optimización de parámetros de perforación y voladura para mejorar la fragmentación del mineral en la mina Las Bambas – Apurímac [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Apurímac, Perú.

□