

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Optimización del proceso de carguío y acarreo mediante la mejora de la fragmentación del macizo rocoso para incrementar la productividad en una operación minera aplicando el modelo Kuz-Ram y validación con split online

Tesis presentada por:

Cosi Cano, Maria Del Carmen

ORCID: 0009-0001-0924-2220

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mag. Paredes Salas, Omar Willy

ORCID: 0009-0000-9860-6630

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 27 de Agosto del 2026

Dictamen: 018572-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 018572, presentado por:

2015701002 - COSI CANO MARIA DEL CARMEN

Titulado:

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGUÍO Y ACARREO MEDIANTE LA MEJORA DE LA FRAGMENTACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN UNA OPERACIÓN MINERA APLICANDO EL MODELO KUZ-RAM Y VALIDACIÓN CON SPLIT ONLINE

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR



29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR



46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGUÍO Y ACARREO MEDIANTE LA MEJORA DE LA FRAGMENTACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN UNA OPERACIÓN MINERA APLICANDO EL MODELO KUZ-RAM Y VALIDACIÓ

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	18%	0%	15%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	13%
2	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	4%
3	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	1%

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo de investigación, en primer lugar, a Dios, por concederme la perseverancia, sabiduría y fortaleza necesarias para afrontar cada desafío y permitirme alcanzar esta meta tan significativa en mi vida. A mi madre, a mis hermanos y mi sobrino, por su amor incondicional, sus consejos, apoyo constante y sacrificios. Gracias por ser mi principal fuente de motivación y por acompañarme a lo largo de este camino, enseñándome con su ejemplo que, con esfuerzo, dedicación y perseverancia, es posible alcanzar los sueños y superar cualquier adversidad. A una persona muy especial en mi vida, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional durante este proceso. Gracias por estar presente en cada etapa, por sus palabras de aliento y por motivarme a seguir adelante ante cada dificultad. Su confianza en mí y su compañía fueron fundamentales para alcanzar esta meta. Finalmente, me dedico este logro a mí misma, por haber tenido la valentía de seguir adelante a pesar de las dificultades, por cada esfuerzo realizado y por mantener la determinación necesaria para culminar esta etapa. Reconozco y valoro el compromiso, la disciplina y la perseverancia que me permitieron llegar hasta aquí.Con cariño y gratitud, dedico este logro a todos aquellos que, de una u otra manera, contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por brindarme la vida, la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional. Agradezco profundamente a mi familia por su amor, apoyo y comprensión, por acompañarme durante todo este proceso y por motivarme constantemente a seguir adelante a pesar de las dificultades. Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a los docentes que contribuyeron a mi formación académica y profesional, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, que fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo de investigación. A mi asesor(a) de tesis, por su orientación, paciencia y valiosas recomendaciones durante la elaboración de esta investigación, contribuyendo significativamente a su culminación. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, brindaron su apoyo y colaboración para hacer posible la realización de este trabajo. A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar el proceso de carguío y acarreo mediante la mejora de la fragmentación del macizo rocoso, aplicando el modelo Kuz-Ram y su validación con el software Split Online en una operación minera a tajo abierto durante el año 2025. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo, con diseño aplicado y comparativo, considerando dos periodos de evaluación: un primer periodo sin optimización y un segundo periodo con la implementación de mejoras en el diseño de voladura. La fragmentación fue estimada mediante el modelo Kuz-Ram y validada con el software Split Online, permitiendo analizar su influencia en los indicadores operativos del sistema.

Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la fragmentación del macizo rocoso, reduciendo el tamaño de partícula P80 de 8.54 a 6.30 pulgadas. Esta optimización permitió incrementar la productividad de carguío de 4,778.99 T/H a 5,793.79 T/H, equivalente a un aumento del 21.23%, así como reducir el tiempo de carguío de 3.89 a 3.07 minutos y disminuir el costo unitario de 0.68 a 0.57 USD/T. Asimismo, la comparación entre el modelo Kuz-Ram y los resultados obtenidos con Split Online mostró una alta concordancia, validando la precisión del modelo aplicado.

Se concluyó que la optimización de la fragmentación del macizo rocoso tiene un impacto directo en la mejora de la productividad, eficiencia operativa y reducción de costos en el proceso de carguío y acarreo. La aplicación del modelo Kuz-Ram y su validación con herramientas digitales constituyen una estrategia efectiva para la optimización de procesos en minería superficial.

Palabras clave: fragmentación, productividad, voladura.

Abstract

This research aimed to optimize the loading and hauling process by improving rock mass fragmentation through the application of the Kuz-Ram model and its validation using Split Online software in an open-pit mining operation during 2025. The methodology followed a quantitative approach with an applied and comparative design, considering two evaluation periods: a first period without optimization and a second period with the implementation of improvements in the blasting design. Fragmentation was estimated using the Kuz-Ram model and validated through Split Online, allowing the analysis of its influence on the operational performance indicators of the system.

The results showed a significant improvement in rock fragmentation, reducing the particle size (P80) from 8.54 inches to 6.30 inches. This optimization led to an increase in loading productivity from 4,778.99 T/H to 5,793.79 T/H, representing a 21.23% improvement. Additionally, loading time was reduced from 3.89 to 3.07 minutes, and the unit cost decreased from 0.68 to 0.57 USD/T. Furthermore, the comparison between the Kuz-Ram model and Split Online results demonstrated a high level of agreement, confirming the reliability of the applied model.

It was concluded that optimizing rock mass fragmentation has a direct impact on improving productivity, operational efficiency, and cost reduction in the loading and hauling process. The application of the Kuz-Ram model, validated with digital tools, represents an effective strategy for process optimization in surface mining operations.

Keywords: fragmentation, productivity, blasting.

Índice general

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Abstract

Introducción 1

Capítulo I: Planteamiento de la investigación 3

1.1 Planteamiento del Problema 3

1.2 Objetivos 4

1.2.1 Objetivo general 4

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 Preguntas de investigación 5

1.3.1 Pregunta general 5

1.3.2 Preguntas específicas 5

1.4 Línea de investigación 6

1.5 Palabras clave 6

1.6 Solución propuesta 6

1.6.1 Justificación e importancia 6

Capítulo II: Fundamentos teóricos 10

2.1 Estado del arte 10

2.1.1 Antecedentes locales 10

2.1.2 Antecedentes nacionales 11

2.1.3 Antecedentes internacionales 12

2.2 Bases teóricas de la investigación 13

2.2.1 Fragmentación del macizo rocoso en voladura 13

2.2.2 Modelo Kuz-Ram para estimación del P80 13

2.2.3 Medición de la fragmentación mediante Split Online 14

2.2.4 Relación entre fragmentación y productividad en carguío y acarreo 14

2.2.5 Enfoque Mine to Mill en la optimización minera 15

2.3 Definiciones 15

2.3.1 Fragmentación 15

2.3.2 Macizo rocoso 15

2.3.3 Voladura 15

2.3.4 P80 16

2.3.5 Modelo Kuz-Ram 16

2.3.6 Split Online 16

2.3.7 Factor de potencia 16

2.3.8 Distribución granulométrica 16

2.3.9 Carguío 16

2.3.10 Acarreo 17

2.3.11 Productividad 17

2.3.12 Tiempo de ciclo 17

2.3.13 Voladura secundaria 17

2.3.14 Mine to Mill 17
2.3.15 Eficiencia operativa 17
2.4 Hipótesis de Investigación 18
2.4.1 Hipótesis General 18
2.4.2 Hipótesis Específicas 18
2.5 Variables 18
2.5.1 Variable independiente 18
2.5.2 Variable dependiente 19
2.5.3 Operacionalización de variables 20
Capítulo III: Marco metodológico 21
3.1 Alcances y limitaciones 21
3.1.1 Alcances 21
3.1.2 Limitaciones 22
3.2 Tipo y nivel de investigación 22
3.2.1 Tipo de investigación 22
3.2.2 Nivel de investigación 23
3.3 Población y muestra 23
3.3.1 Población 23
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 24

3.5 Plan de análisis de los datos 25

3.5.1 Técnicas de análisis de datos 25

3.6 Procedimiento de la investigación 25

Capítulo IV: Resultados y análisis 26

4.1 Resultados 26

4.2 Cálculo y definición operativa de los indicadores clave de desempeño (KPI) del proceso de carguío y acarreo 27

4.2.1 Definición operativa de la productividad de carguío (T/H) 27

4.2.2 Definición operativa del tiempo de carguío (min) 28

4.2.3 Definición operativa del costo unitario de minado (USD/T) 28

4.2.4 Relación de los KPI con la fragmentación del macizo rocoso 29

4.3 Aplicación del modelo Kuz-Ram (sin mejora) 31

4.4 Aplicación del modelo Kuz-Ram (con mejora) 33

4.4.1 Aclaración del uso del modelo Kuz-Ram 35

4.4.2 Justificación del factor de roca A 35

4.4.3 Justificación de los parámetros usados 35

4.5 Validación del modelo Kuz-Ram mediante comparación de fragmentación P80 con Split Online 39

4.6 Análisis estadístico de significancia de los indicadores operacionales 41

4.7 Modelamiento de la relación fragmentación y productividad mediante regresión 42

4.7.1 Regresión lineal simple entre P80 y productividad (T/H) 42

4.7.2 Regresión múltiple considerando P80, factor de potencia y tiempo de carguío 44

4.8 Resultados por objetivos 46

4.8.1 Resultados del objetivo general 46

4.8.2 Resultados del objetivo específico 1 46

4.8.3 Resultados del objetivo específico 2 47

4.8.4 Resultados del objetivo específico 3 47

4.9 Aplicación y resultados del software Split Online 71

4.9.1 Aplicación del software split online 71

4.9.2 Resultados obtenidos con split online 71

4.9.3 Validación del modelo Kuz-Ram con split online 72

4.10 Análisis 81

4.10.1 Producción de carguío (T/H) 81

4.10.2 Tiempo de carguío (min) 82

4.10.3 Fragmentación del macizo rocoso (P80) 82

4.10.4 Factor de potencia (kg/t) 82

4.10.5 Costo unitario de minado (USD/T) 83

4.10.6 Análisis integral de los KPI 83

4.11 Contrastación de hipótesis 83

4.11.1 Contrastación de la hipótesis general 83

4.11.2 Contrastación de las hipótesis específicas 84

4.11.3 Hipótesis específica 2 84

4.11.4 Hipótesis específica 3 85

4.12 Discusión general de resultados..... 85

Conclusiones..... 88

Recomendaciones 90

Referencias Bibliográficas..... 91

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables 20

Tabla 2 Nomenclatura 27

Tabla 3 Descripción costo unitarios 29

Tabla 4 Parámetros del primer periodo 30

Tabla 5 Parámetros Kuz-Ram primer periodo (sin mejora) 32

Tabla 6 Parámetros Kuz-Ram segundo periodo (con mejora) 34

Tabla 7 Parámetros del segundo periodo 36

Tabla 8 Comparativa del diseño de voladura y fragmentación 38

Tabla 9 Comparación del P80 estimado mediante Kuz-Ram y P80 medido con Split Online por disparo 40

Tabla 10 Análisis descriptivo de indicadores operacionales entre periodos 41

Tabla 11 Prueba t de Student pareada entre primer y segundo periodo 42

Tabla 12 Modelo de regresión lineal simple P80 vs T/H 43

Tabla 13 Resultados de regresión múltiple 45

Tabla 14 Resumen del modelo 45

Tabla 15 Parámetros julio 2025 49

Tabla 16 Parámetros de agosto 2025 51

Tabla 17 Parámetros de septiembre 2025 53

Tabla 18 Parámetros de octubre 2025 55

Tabla 19 Parámetros de noviembre 2025 57

Tabla 20 Parámetros de diciembre 2025 59

Tabla 21 Parámetros de explosivos y caracterización del macizo rocoso 79

Tabla 22 Resultados generales del primer y segundo periodo 81

Índice de figuras

Figura 1. Producción mensual 61

Figura 2. Producción por periodo 62

Figura 3. Tiempo de carguío mensual 63

Figura 4. Tiempo de carguío de pala por periodo 64

Figura 5. Fragmentación mensual 65

Figura 6. Fragmentación por periodo 66

Figura 7. Factor de potencia mensual 67

Figura 8. Factor de potencia por periodo 68

Figura 9. Costo de minado mensual 69

Figura 10. Costo de minado por periodo 70

Figura 11. Posición de equipos del Split online 73

Figura 12. Equipo split online 74

Figura 13. Frente de minado 75

Figura 14. Escala de grises 75

Figura 15. Proceso split online 76

Figura 16. Diagrama split online 77

Figura 17. Resultados fragmentación 78

Introducción

En el contexto de la minería a tajo abierto, la eficiencia del proceso de carguío y acarreo depende en gran medida de la calidad de la fragmentación del macizo rocoso generada durante la voladura. Una fragmentación inadecuada, caracterizada por la presencia de material sobredimensionado, incrementa los tiempos de carguío, reduce la productividad de los equipos y eleva los costos operativos. Por el contrario, una fragmentación óptima permite mejorar la excavabilidad del material, optimizar el ciclo de carguío y maximizar el rendimiento del sistema minero. En este sentido, la optimización del diseño de voladura constituye un factor clave para mejorar la eficiencia global de las operaciones mineras.

La presente investigación se desarrolló en una operación minera a tajo abierto, considerando los bancos comprendidos entre los niveles 3500 y 3700, donde se evaluó el impacto de la optimización de la fragmentación sobre el proceso de carguío y acarreo. Para ello, se aplicó el modelo Kuz-Ram como herramienta de predicción del tamaño de fragmentación (P80), complementado con la validación mediante el software Split Online, el cual permitió analizar la distribución granulométrica del material volado en condiciones reales de operación.

La metodología adoptada correspondió a un enfoque cuantitativo con diseño aplicado y comparativo, considerando dos periodos de evaluación durante el año 2025: un primer periodo sin la implementación de mejoras en el diseño de voladura y un segundo periodo con la optimización de los parámetros de voladura, tales como burden, espaciamiento y longitud de carga explosiva. A partir de esta comparación, se analizaron indicadores clave de desempeño, como la productividad de carguío (T/H), el tiempo de carguío, la fragmentación (P80), el factor de potencia y el costo unitario del proceso.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la mejora en la fragmentación del macizo rocoso permitió reducir el tamaño de partícula, optimizar la excavabilidad del material y

mejorar la eficiencia operativa del sistema. Asimismo, se demostró que el uso del modelo Kuz-Ram, validado con herramientas digitales como Split Online, constituye una estrategia efectiva para la optimización del diseño de voladura y la mejora del desempeño del proceso de carguío y acarreo.

En este contexto, la investigación aporta evidencia técnica y práctica sobre la importancia de la fragmentación como variable determinante en la productividad minera, proponiendo un enfoque metodológico que integra modelos teóricos y herramientas digitales para la optimización de procesos en minería superficial.

Capítulo I: Planteamiento de la investigación

1.1 Planteamiento del Problema

En el contexto de la minería a tajo abierto en el Perú, la eficiencia del proceso de carguío y acarreo representa un factor determinante en la productividad global de la operación. En unidades de gran escala como la Mina Quellaveco, operada por Anglo American, donde se procesan aproximadamente 127,500 toneladas de mineral triturado por día, la continuidad operativa depende en gran medida de la adecuada interacción entre la voladura, la fragmentación del macizo rocoso y el rendimiento de los equipos de carguío y transporte. En este escenario, cualquier deficiencia en la fragmentación genera impactos directos en los tiempos de ciclo, consumo energético y costos unitarios del proceso minero. (Anglo American, 2024)

En la práctica operativa, se ha evidenciado que una fragmentación inadecuada del macizo rocoso, caracterizada por tamaños de partícula elevados y distribución heterogénea, ocasiona dificultades durante el proceso de carguío, incrementando el tiempo de llenado de los equipos, reduciendo la eficiencia de los ciclos de acarreo y generando mayores requerimientos de voladura secundaria. Estas condiciones afectan negativamente indicadores clave como la productividad en toneladas por hora, el costo por tonelada transportada y el desgaste de equipos, lo cual repercute directamente en la rentabilidad de la operación minera. (Cunningham, 1983)

Asimismo, en operaciones ubicadas entre los niveles 3500 y 3700, las variaciones en las características geomecánicas del macizo rocoso influyen significativamente en los resultados de la voladura, generando inconsistencias en la fragmentación obtenida. A pesar de la aplicación de diseños convencionales de perforación y voladura, no se ha logrado un control adecuado del tamaño de fragmentación, lo que limita el desempeño óptimo del sistema de carguío y acarreo. En este contexto, se hace necesario implementar modelos

predictivos como el modelo Kuz-Ram, que permite estimar el tamaño de fragmentación P80 en función de parámetros de diseño de voladura, y herramientas tecnológicas como el software Split Online, que posibilita la medición y validación en tiempo real de la fragmentación del material volado. (Kuznetsov, 1973; Rammler, 1933)

Por otro lado, la ausencia de una integración adecuada entre el diseño de voladura y el desempeño de los procesos posteriores, como el carguío y acarreo, evidencia una brecha en la gestión operativa. En muchos casos, la planificación de la voladura se realiza sin considerar su impacto directo en la eficiencia de los equipos de carguío, lo que genera ineficiencias sistémicas en el ciclo de minado. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de adoptar un enfoque integral tipo Mine to Mill, orientado a optimizar la fragmentación desde la voladura hasta las etapas posteriores del proceso productivo. (Napier-Munn et al., 1996)

En consecuencia, se identifica como problema central la baja eficiencia del proceso de carguío y acarreo debido a una fragmentación no óptima del macizo rocoso, lo cual limita la productividad en la operación minera. Frente a esta problemática, surge la necesidad de optimizar los parámetros de voladura mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram y validar los resultados obtenidos con el software Split Online durante el año 2025, con la finalidad de mejorar la fragmentación y, en consecuencia, incrementar la productividad del sistema de carguío y acarreo en la operación minera analizada. (Kanchibotla et al., 1999)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Optimizar el proceso de carguío y acarreo mediante la mejora de la fragmentación del macizo rocoso, aplicando el modelo Kuz-Ram y su validación con Split Online para incrementar la productividad en una operación minera durante el año 2025.

1.2.2 Objetivos específicos

- Aplicar el modelo Kuz-Ram para estimar el tamaño de fragmentación P80 en función de los parámetros de diseño de voladura en la operación minera durante el año 2025.
- Validar la fragmentación del macizo rocoso mediante el software Split Online, comparando los resultados obtenidos con el modelo Kuz-Ram durante el año 2025.
- Evaluar la influencia de la fragmentación del macizo rocoso en los tiempos de carguío y acarreo para incrementar la productividad del sistema en la operación minera durante el año 2025.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta general

- ¿Cómo la optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram y su validación con Split Online permitirá mejorar la productividad del proceso de carguío y acarreo en una operación minera durante el año 2025?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿De qué manera la aplicación del modelo Kuz-Ram permitirá estimar el tamaño de fragmentación P80 en función de los parámetros de diseño de voladura en la operación minera durante el año 2025?
- ¿Cómo la medición de la fragmentación mediante el software Split Online permitirá validar los resultados obtenidos del modelo Kuz-Ram en la operación minera durante el año 2025?

- ¿En qué medida la mejora de la fragmentación del macizo rocoso permitirá optimizar los tiempos de carguío y acarreo, incrementando la productividad del sistema en la operación minera durante el año 2025?

1.4 Línea de investigación

La presente investigación se enmarca en la línea de Optimización de Procesos Mineros, debido a que se orienta al mejoramiento del proceso de carguío y acarreo mediante la optimización de la fragmentación del macizo rocoso generada en la etapa de voladura. El estudio se desarrolla en una operación minera a tajo abierto ubicada entre los bancos 3500 y 3700, considerando las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y su influencia directa en la eficiencia de los procesos posteriores. Para el análisis se emplean herramientas como el modelo Kuz-Ram para la estimación del tamaño de fragmentación P80 y el software Split Online para la medición y validación de la fragmentación obtenida en campo. La investigación compara dos periodos del año 2025, un periodo inicial sin optimización de los parámetros de voladura y un periodo posterior con la implementación de mejoras en el diseño, con el propósito de optimizar la fragmentación, reducir los tiempos de carguío, mejorar el rendimiento del acarreo e incrementar la productividad del sistema bajo un enfoque integrado tipo Mine to Mill. (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983; Kanchibotla et al., 1999)

1.5 Palabras clave

Fragmentación, productividad, optimización.

1.6 Solución propuesta

1.6.1 Justificación e importancia

Justificación técnica: La presente investigación se justifica desde el enfoque técnico debido a que aborda la optimización de la fragmentación del macizo rocoso como un factor determinante en la eficiencia de los procesos de carguío y acarreo en

minería a tajo abierto. La aplicación del modelo Kuz-Ram permitirá estimar el tamaño de fragmentación P80 en función de parámetros de diseño de voladura, mientras que el uso del software Split Online permitirá validar los resultados en campo mediante análisis digital de imágenes. Esta integración de herramientas técnicas permitirá mejorar la calidad de la fragmentación, reduciendo la presencia de sobredimensionados y optimizando la distribución granulométrica del material, lo que impacta directamente en el desempeño de los equipos de carguío y en la continuidad operativa del sistema minero. (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983)

Justificación metodológica: Desde el punto de vista metodológico, la investigación se fundamenta en un enfoque cuantitativo aplicado, basado en la comparación de dos periodos operativos durante el año 2025, uno sin mejora y otro con la implementación de la optimización de la fragmentación. Se emplearán modelos matemáticos reconocidos en la ingeniería de minas, como Kuz-Ram, junto con herramientas tecnológicas como Split Online, lo que permitirá obtener resultados medibles, reproducibles y validados en condiciones reales de operación. Esta metodología permitirá establecer relaciones causa-efecto entre la fragmentación del macizo rocoso y la productividad del proceso de carguío y acarreo, aportando rigor científico al análisis y confiabilidad a los resultados obtenidos. (Kanchibotla et al., 1999; Napier-Munn et al., 1996)

Justificación operacional: En el ámbito operacional, la investigación permitirá identificar y corregir ineficiencias en el proceso de carguío y acarreo generadas por una fragmentación inadecuada del material volado. Una mejora en la fragmentación reducirá los tiempos de carguío, disminuirá la necesidad de voladura secundaria y optimizará el desempeño de los equipos de carguío y transporte. Esto contribuirá a mejorar indicadores operativos como toneladas por hora y tiempo de ciclo, permitiendo

una mayor continuidad en las operaciones y una mejor utilización de los recursos disponibles en la unidad minera. (Valery & Jankovic, 2002)

Justificación económica: Desde el punto de vista económico, la optimización de la fragmentación del macizo rocoso permitirá reducir los costos unitarios asociados al proceso de carguío y acarreo. Una fragmentación adecuada disminuye el consumo de combustible, reduce el desgaste de equipos y minimiza la necesidad de operaciones adicionales como la voladura secundaria o el uso de equipos auxiliares. En consecuencia, se logrará una reducción significativa en el costo por tonelada transportada, mejorando la rentabilidad de la operación minera y contribuyendo a una gestión eficiente de los recursos financieros. (Kanchibotla et al., 1999; Napier-Munn et al., 1996)

Justificación social: En el aspecto social, la investigación contribuye al desarrollo sostenible de la actividad minera al promover una operación más eficiente y responsable. La mejora en la productividad permite asegurar la continuidad de las operaciones, generando estabilidad laboral y oportunidades de desarrollo para los trabajadores y las comunidades vinculadas a la actividad minera. Asimismo, la optimización de procesos reduce impactos indirectos como el consumo excesivo de recursos y la generación de residuos, contribuyendo a una minería más sostenible y alineada con las buenas prácticas internacionales. (Valery & Jankovic, 2002)

Justificación en seguridad: Desde la perspectiva de seguridad, una adecuada fragmentación del macizo rocoso reduce significativamente los riesgos asociados a la manipulación de material sobredimensionado, como la exposición a caídas de rocas, atascos en equipos y operaciones adicionales de fragmentación secundaria. Al obtener un tamaño de fragmentación óptimo, se mejora la estabilidad del material y se disminuyen las condiciones inseguras durante las etapas de carguío y transporte. De

esta manera, la investigación contribuye a fortalecer las condiciones de seguridad en la operación minera, reduciendo la probabilidad de incidentes y promoviendo un entorno de trabajo más seguro para el personal. (Hustrulid & Bullock, 2001)

Capítulo II: Fundamentos teóricos

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes locales

- Según Quispe (2023), en su tesis “Optimización de la fragmentación mediante control de voladura en mina a tajo abierto”, en la Universidad Nacional de Moquegua. El objetivo fue mejorar la fragmentación del macizo rocoso para optimizar el rendimiento de carguío en operaciones similares a Quellaveco. La metodología fue cuantitativa, de diseño aplicado y comparativo, utilizando modelos de predicción de fragmentación y análisis de imágenes. La muestra estuvo conformada por ciclos de voladura en bancos operativos. Los resultados evidenciaron una reducción del P80 en 15% y un incremento en la productividad de carguío. Se concluye que la optimización del diseño de voladura impacta directamente en la eficiencia del sistema de carguío. Este estudio aporta al presente trabajo al demostrar la relación directa entre fragmentación y productividad en minería superficial.
- Según Mamani (2022), en su tesis “Mejora del rendimiento de equipos de carguío mediante optimización de la fragmentación en mina a cielo abierto”, en la Universidad José Carlos Mariátegui. El objetivo fue evaluar la influencia de la fragmentación en los tiempos de carguío. La metodología fue cuantitativa con diseño pre experimental, empleando análisis de campo y software de fragmentación. La muestra consideró registros operativos diarios. Los resultados mostraron reducción en tiempos de carguío y mejora en eficiencia del equipo. Se concluye que la fragmentación adecuada reduce tiempos muertos y mejora la productividad. Este antecedente aporta evidencia directa del impacto operativo de la fragmentación.

- Según Flores (2021), en su tesis “Optimización de parámetros de voladura para mejorar la productividad en operaciones mineras superficiales”, en la Universidad Nacional de Moquegua. El objetivo fue optimizar parámetros de diseño de voladura para mejorar la eficiencia operativa. La metodología fue cuantitativa, con diseño comparativo. La muestra incluyó datos de voladura antes y después de la optimización. Los resultados evidenciaron mejoras en fragmentación y reducción de costos operativos. Se concluye que el control del diseño de voladura mejora el desempeño global del sistema minero. Este estudio aporta fundamentos técnicos para la aplicación del modelo Kuz-Ram en la investigación.

2.1.2 Antecedentes nacionales

- Según García (2024), en su tesis “Optimización de la fragmentación para mejorar la productividad en minería a tajo abierto”, en la Universidad Nacional de San Agustín. El objetivo fue evaluar la relación entre fragmentación y productividad. La metodología fue cuantitativa, correlacional. La muestra incluyó datos operativos de voladura y carguío. Los resultados mostraron que una reducción del P80 mejora la eficiencia en carguío. Se concluye que la fragmentación es un factor crítico en la productividad minera. Este antecedente aporta sustento estadístico a la relación entre variables.
- Según Torres (2023), en su tesis “Aplicación del modelo Kuz-Ram para optimizar la fragmentación en mina superficial”, en la Universidad Nacional de Ingeniería. El objetivo fue aplicar el modelo Kuz-Ram para mejorar la fragmentación. La metodología fue aplicada y cuantitativa. La muestra incluyó datos de voladura en campo. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la predicción del P80. Se concluye que el modelo Kuz-Ram es

una herramienta eficaz para el diseño de voladura. Este estudio aporta base metodológica para la investigación.

- Según Rojas (2022), en su tesis "Evaluación de la fragmentación mediante análisis digital en minería superficial", en la Universidad Nacional de Cajamarca. El objetivo fue evaluar la fragmentación usando software especializado. La metodología fue cuantitativa experimental. La muestra incluyó imágenes de material fragmentado. Los resultados mostraron alta precisión del análisis digital. Se concluye que herramientas como Split Online permiten validar modelos teóricos. Este antecedente aporta soporte al uso de herramientas tecnológicas en la investigación.

2.1.3 Antecedentes internacionales

- Según González (2023), en su tesis "Optimización de voladura para mejorar la fragmentación en minería a cielo abierto", en la Universidad de Antofagasta. El objetivo fue mejorar la fragmentación mediante ajuste de parámetros de voladura. La metodología fue cuantitativa aplicada. La muestra incluyó bancos de producción. Los resultados evidenciaron mejora en fragmentación y reducción de costos. Se concluye que la optimización de voladura mejora la eficiencia global. Este estudio aporta comparación internacional relevante.
- Según Pérez (2022), en su tesis "Relación entre fragmentación y eficiencia de carguío en minería superficial", en la Universidad de Chile. El objetivo fue analizar la influencia de la fragmentación en el rendimiento de equipos. La metodología fue correlacional. La muestra incluyó datos operativos. Los resultados confirmaron la relación directa entre fragmentación y productividad. Este antecedente refuerza el enfoque Mine to Mill aplicado en la investigación.

- Según Martínez (2021), en su tesis “Optimización de procesos de voladura para mejorar la fragmentación en minería”, en la Universidad Politécnica de Madrid. El objetivo fue optimizar la fragmentación mediante modelos matemáticos. La metodología fue cuantitativa aplicada. La muestra incluyó datos de voladura. Los resultados evidenciaron mejora en distribución granulométrica. Se concluye que los modelos predictivos permiten optimizar el proceso minero. Este estudio aporta base teórica internacional para la investigación.

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 Fragmentación del macizo rocoso en voladura

La fragmentación del macizo rocoso constituye uno de los resultados más importantes del proceso de perforación y voladura en minería, ya que determina el tamaño de los fragmentos generados y su distribución granulométrica. Esta fragmentación depende de factores como las propiedades geomecánicas del macizo, el diseño de la malla de perforación, el tipo de explosivo y la secuencia de detonación. Una fragmentación adecuada permite optimizar las operaciones posteriores como el carguío, acarreo y chancado, mientras que una fragmentación deficiente genera incrementos en costos operativos y disminución de la productividad. En este contexto, la fragmentación es considerada un parámetro clave dentro del enfoque de optimización integral del proceso minero. (Hustrulid & Bullock, 2001; Persson et al., 1994)

2.2.2 Modelo Kuz-Ram para estimación del P80

El modelo Kuz-Ram es un modelo matemático ampliamente utilizado en la ingeniería de minas para estimar la fragmentación resultante de una voladura, específicamente el tamaño característico P80. Este modelo combina la ecuación de Kuznetsov, que relaciona el tamaño medio de fragmento con el factor de potencia y las

propiedades de la roca, con la función de distribución de Rosin-Rammler, que describe la distribución granulométrica del material fragmentado. La aplicación del modelo Kuz-Ram permite predecir la calidad de la fragmentación en función de variables controlables del diseño de voladura, facilitando la optimización de los parámetros operativos y la mejora del desempeño en las etapas posteriores del proceso productivo. (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983; Rammler, 1933)

2.2.3 Medición de la fragmentación mediante Split Online

El software Split Online es una herramienta tecnológica utilizada para el análisis de la fragmentación del material volado mediante procesamiento digital de imágenes en tiempo real. Este sistema permite capturar imágenes del material fragmentado en campo y procesarlas para obtener la distribución granulométrica, incluyendo indicadores como el P80. La utilización de Split Online permite validar los resultados estimados por modelos matemáticos como Kuz-Ram, proporcionando información precisa y continua sobre la calidad de la fragmentación. Esta herramienta contribuye a la toma de decisiones en tiempo real y a la mejora continua del proceso de voladura. (Split Engineering, 2023)

2.2.4 Relación entre fragmentación y productividad en carguío y acarreo

La fragmentación del macizo rocoso tiene una influencia directa en la productividad del proceso de carguío y acarreo, ya que el tamaño y la forma de los fragmentos afectan la eficiencia de los equipos de carguío y el tiempo de ciclo de transporte. Una fragmentación adecuada facilita el llenado de los equipos, reduce los tiempos de carguío y minimiza la necesidad de operaciones adicionales como la voladura secundaria. Por el contrario, la presencia de material sobredimensionado genera interrupciones en el proceso, incrementa el desgaste de equipos y reduce la eficiencia operativa. En este sentido, la optimización de la fragmentación se convierte

en una estrategia clave para mejorar la productividad global de la operación minera. (Kanchibotla et al., 1999; Valery & Jankovic, 2002)

2.2.5 Enfoque Mine to Mill en la optimización minera

El enfoque Mine to Mill se basa en la integración de todas las etapas del proceso minero, desde la voladura hasta la conminución, con el objetivo de optimizar el rendimiento global del sistema. Este enfoque reconoce que las decisiones tomadas en la etapa de voladura tienen un impacto significativo en las operaciones posteriores, como el carguío, acarreo, chancado y molienda. La aplicación del enfoque Mine to Mill permite mejorar la fragmentación, reducir los costos operativos y aumentar la eficiencia energética del proceso, promoviendo una gestión integral y optimizada de la operación minera. (Napier-Munn et al., 1996; Valery & Jankovic, 2002)

2.3 Definiciones

2.3.1 Fragmentación

Se define como el proceso mediante el cual el macizo rocoso es desintegrado en fragmentos de diferentes tamaños como resultado de la aplicación de energía explosiva, influyendo directamente en la eficiencia de las operaciones mineras posteriores. (Hustrulid & Bullock, 2001)

2.3.2 Macizo rocoso

Se conceptualiza como el conjunto de rocas intactas y discontinuidades geológicas que conforman una masa estructural, cuyas propiedades físicas y mecánicas determinan su comportamiento frente a la voladura. (Persson et al., 1994)

2.3.3 Voladura

Es el proceso de fragmentación del macizo rocoso mediante el uso controlado de explosivos, con el objetivo de facilitar la extracción del material en operaciones mineras. (Hustrulid & Bullock, 2001)

2.3.4 P80

Se define como el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material fragmentado, siendo un indicador clave de la calidad de la fragmentación. (Kuznetsov, 1973)

2.3.5 Modelo Kuz-Ram

Se conceptualiza como un modelo matemático que permite estimar la fragmentación de roca generada por voladura, combinando la ecuación de Kuznetsov y la distribución de Rosin-Rammler. (Cunningham, 1983)

2.3.6 Split Online

Es un software de análisis de imágenes que permite medir la fragmentación del material volado en tiempo real mediante procesamiento digital de imágenes. (Split Engineering, 2023)

2.3.7 Factor de potencia

Se define como la cantidad de explosivo utilizada por unidad de volumen o masa de roca, siendo un parámetro clave en el diseño de voladura. (Persson et al., 1994)

2.3.8 Distribución granulométrica

Se conceptualiza como la proporción de partículas de diferentes tamaños presentes en un material fragmentado, utilizada para evaluar la calidad de la fragmentación. (Rammler, 1933)

2.3.9 Carguío

Es la operación minera que consiste en la recolección y carga del material fragmentado mediante equipos como palas o cargadores hacia unidades de transporte. (Valery & Jankovic, 2002)

2.3.10 Acarreo

Se define como el transporte del material desde el punto de carga hasta su destino final, utilizando equipos como camiones mineros, siendo un proceso clave en la cadena productiva. (Valery & Jankovic, 2002)

2.3.11 Productividad

Se conceptualiza como la relación entre la cantidad de material producido y los recursos utilizados en un determinado tiempo, reflejando la eficiencia del sistema operativo. (Kanchibotla et al., 1999)

2.3.12 Tiempo de ciclo

Se define como el tiempo total requerido para completar un ciclo de carguío y acarreo, incluyendo carga, transporte, descarga y retorno. (Valery & Jankovic, 2002)

2.3.13 Voladura secundaria

Es el proceso adicional de fragmentación aplicado a bloques sobredimensionados que no cumplen con el tamaño requerido tras la voladura primaria. (Hustrulid & Bullock, 2001)

2.3.14 Mine to Mill

Se conceptualiza como un enfoque integral que busca optimizar todas las etapas del proceso minero, desde la voladura hasta la molienda, para mejorar la eficiencia global. (Napier-Munn et al., 1996)

2.3.15 Eficiencia operativa

Se define como la capacidad de un sistema para maximizar la producción utilizando los recursos disponibles de manera óptima, minimizando pérdidas y costos. (Kanchibotla et al., 1999)

2.4 Hipótesis de Investigación

2.4.1 Hipótesis General

- La optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram y su validación con Split Online permitirá mejorar significativamente la productividad del proceso de carguío y acarreo en una operación minera durante el año 2025.

2.4.2 Hipótesis Específicas

- La aplicación del modelo Kuz-Ram permitirá estimar de manera precisa el tamaño de fragmentación P80 en función de los parámetros de diseño de voladura en la operación minera durante el año 2025.
- La validación de la fragmentación mediante el software Split Online permitirá corroborar la confiabilidad de los resultados obtenidos con el modelo Kuz-Ram en la operación minera durante el año 2025.
- La mejora de la fragmentación del macizo rocoso permitirá reducir los tiempos de carguío y acarreo, incrementando significativamente la productividad del sistema en la operación minera durante el año 2025.

2.5 Variables

2.5.1 Variable independiente

La fragmentación del macizo rocoso se define como el resultado del proceso de voladura mediante el cual la roca intacta es transformada en fragmentos de distintos tamaños, cuya distribución granulométrica influye directamente en la eficiencia de las operaciones posteriores como el carguío, acarreo y chancado. Este fenómeno depende de variables como el diseño de la malla de perforación, el tipo y cantidad de explosivo, las características geomecánicas del macizo rocoso y la secuencia de detonación. En el ámbito de la ingeniería de minas, la fragmentación se evalúa comúnmente mediante

indicadores como el tamaño medio o el P80, que representa el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material fragmentado, siendo estimado a través de modelos como Kuz-Ram y validado mediante herramientas digitales como Split Online, lo cual permite optimizar el rendimiento operativo y reducir costos en el proceso minero. (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983)

VI: Fragmentación del macizo rocoso.

2.5.2 Variable dependiente

La productividad del proceso de carguío y acarreo se conceptualiza como la capacidad del sistema minero para movilizar la mayor cantidad de material en el menor tiempo posible, utilizando de manera eficiente los recursos disponibles como equipos, energía y mano de obra. Este indicador se mide generalmente en términos de toneladas por hora o por ciclo, y está directamente influenciado por factores operativos como el tiempo de carguío, la eficiencia del equipo, las condiciones de la vía de acarreo y, principalmente, la fragmentación del material volado. Una adecuada fragmentación permite reducir los tiempos de llenado de los equipos de carguío, minimizar la necesidad de voladura secundaria y mejorar la continuidad del proceso, lo que se traduce en una mayor eficiencia global de la operación bajo el enfoque integrado de optimización Mine to Mill. (Kanchibotla et al., 1999; Valery & Jankovic, 2002)

VD: Productividad del proceso de carguío y acarreo.

2.5.3 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Indicador	Medición	Unidad
VI: Fragmentación del macizo rocoso	Resultado del proceso de voladura que determina la distribución de tamaños de los fragmentos de roca, influyendo en la eficiencia de los procesos posteriores como carguío y acarreo, evaluado mediante modelos matemáticos como Kuz-Ram y validado con software de análisis digital. (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983)	Tamaño de fragmentación (P80)	Estimación mediante modelo Kuz-Ram y validación con software Split Online	Pulgadas (in)
		Factor de potencia	Relación entre cantidad de explosivo utilizado y volumen de roca volada	kg/m^3
		Distribución granulométrica	Análisis digital de imágenes mediante Split Online	% pasante
VD: Productividad del proceso de carguío y acarreo	Capacidad del sistema minero para movilizar material de forma eficiente en función del tiempo, influenciada por la fragmentación del material, el rendimiento de equipos y las condiciones operativas. (Kanchibotla et al., 1999; Valery & Jankovic, 2002)	Producción	Toneladas transportadas por unidad de tiempo	T/H
		Tiempo de ciclo de carguío	Tiempo requerido para cargar un equipo de acarreo	minutos
		Eficiencia de carguío	Relación entre capacidad real y capacidad nominal del equipo	%
		Costo unitario de acarreo	Costo asociado al transporte por tonelada movilizada	USD/T

Nota: Elaboración propia

Capítulo III: Marco metodológico

3.1 Alcances y limitaciones

3.1.1 Alcances

La presente investigación se orientará al análisis de la relación entre la optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram y su validación con Split Online, y el comportamiento de los indicadores de productividad del proceso de carguío y acarreo en una operación minera superficial durante el año 2025. El estudio se desarrollará bajo las condiciones geológicas, geomecánicas y operativas existentes en los bancos comprendidos entre los niveles 3500 y 3700, por lo que los resultados obtenidos representarán el comportamiento específico de dicha zona de evaluación.

El alcance comprenderá la comparación de dos periodos operacionales, considerando un primer periodo con las condiciones iniciales de fragmentación y un segundo periodo posterior a la optimización de parámetros de voladura. Se evaluarán indicadores como el tamaño de fragmentación P80 estimado mediante Kuz-Ram y medido mediante Split Online, productividad de carguío (T/H), tiempo de carguío (min), factor de potencia (kg/t) y costo unitario (USD/T), con la finalidad de determinar la variación de estos indicadores bajo las condiciones particulares del proceso analizado.

Asimismo, los resultados obtenidos permitirán establecer una relación técnica entre la mejora de la fragmentación y el desempeño operacional del sistema de carguío y acarreo; sin embargo, su aplicación directa en otras operaciones deberá considerar las características propias del macizo rocoso, diseño de voladura, equipos disponibles y condiciones operacionales existentes. (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983; Valery & Jankovic, 2002)

3.1.2 Limitaciones

Las principales limitaciones de la investigación estarán relacionadas con que los resultados obtenidos corresponderán exclusivamente a las condiciones específicas de la operación minera evaluada durante el periodo de estudio 2025. Las características del macizo rocoso, parámetros de perforación y voladura, tipo de explosivo utilizado, configuración de equipos y condiciones operacionales podrán variar en otras zonas mineras, por lo que los resultados no deberán generalizarse sin una evaluación técnica previa.

Asimismo, aunque la investigación analizará la relación entre la fragmentación del macizo rocoso y los indicadores de carguío y acarreo, existen otros factores operacionales que también pueden influir en la productividad, tales como disponibilidad mecánica de equipos, experiencia del operador, condiciones de las vías de acarreo, mantenimiento de maquinaria y gestión operacional. Debido a que estas variables no serán controladas directamente dentro del estudio, los resultados serán interpretados considerando únicamente las condiciones evaluadas.

Finalmente, la precisión del análisis dependerá de la calidad de los datos registrados en campo, la correcta aplicación del modelo Kuz-Ram y la representatividad de las mediciones realizadas mediante Split Online. Estas limitaciones no invalidarán los resultados obtenidos, pero establecerán el contexto específico bajo el cual deberán ser interpretadas las mejoras observadas en los indicadores operacionales. (Napier-Munn et al., 1996)

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación será de tipo aplicada, ya que estará orientada a resolver un problema específico en una operación minera real, mediante la optimización de la

fragmentación del macizo rocoso para mejorar la productividad del sistema de carguío y acarreo, generando resultados que podrán ser utilizados directamente en la mejora de procesos operativos. (Hernández-Sampieri et al., 2014)

3.2.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación será explicativo, debido a que se buscará establecer la relación causa-efecto entre la fragmentación del macizo rocoso y la productividad del proceso de carguío y acarreo, analizando cómo la variación en el tamaño de fragmentación influye en los indicadores operativos del sistema minero. (Hernández-Sampieri et al., 2014)

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población estará conformada por todos los ciclos de perforación, voladura, carguío y acarreo ejecutados durante el año 2025 en los bancos 3500 y 3700 de la operación minera. Esta población incluye registros operativos diarios relacionados con fragmentación, tiempos de ciclo, producción y costos, los cuales serán utilizados para el análisis comparativo del desempeño del sistema. (Montgomery, 2019)

3.3.2 Muestra

La muestra será de tipo no probabilística intencional, seleccionando los datos correspondientes a dos periodos del año 2025: un periodo sin mejora y otro con la implementación de la optimización de la fragmentación. Esta selección permitirá realizar comparaciones directas entre ambos escenarios y evaluar el impacto de la variable independiente sobre la variable dependiente. (Hernández-Sampieri et al., 2014)

3.4 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Método de la investigación

El método de investigación será cuantitativo, basado en la recolección y análisis de datos numéricos relacionados con la fragmentación del macizo rocoso, productividad, tiempos de ciclo y costos operativos. Asimismo, se aplicará el método comparativo para evaluar las diferencias entre los periodos analizados, permitiendo determinar el impacto de la optimización implementada. (Hernández-Sampieri et al., 2014)

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

Las técnicas empleadas serán la observación directa de los procesos operativos, el análisis documental de reportes de producción y registros históricos, así como la medición digital de la fragmentación mediante herramientas tecnológicas. Estas técnicas permitirán obtener información confiable y representativa del comportamiento del sistema minero. (Kanchibotla et al., 1999)

3.4.3 Instrumentos de recolección de datos

- Software Split Online para la medición de la fragmentación del material volado mediante análisis digital de imágenes.
- Modelo matemático Kuz-Ram para la estimación del tamaño de fragmentación P80 en función de los parámetros de voladura.
- Reportes de producción diaria para el registro de toneladas movidas (T/H)
- Registros de tiempos de ciclo de carguío y acarreo.
- Reportes de consumo de combustible y costos operativos.
- Fichas de recolección de datos diseñadas para el registro sistemático de la información en campo.
- Planillas de control operativo del sistema de carguío y acarreo.

3.5 Plan de análisis de los datos

3.5.1 Técnicas de análisis de datos

El análisis de los datos se realizará mediante técnicas estadísticas descriptivas y comparativas, evaluando indicadores como P80, productividad (T/H), tiempo de ciclo y costo unitario. Se aplicará el análisis de variación porcentual entre los periodos evaluados, así como análisis de correlación para determinar la relación entre las variables, permitiendo validar las hipótesis planteadas en la investigación. (Montgomery, 2019)

3.6 Procedimiento de la investigación

- Recopilar información geomecánica del macizo rocoso en los bancos 3500 al 3700.
- Registrar los parámetros de diseño de perforación y voladura del periodo sin mejora.
- Medir la fragmentación inicial del material volado utilizando el software Split Online.
- Registrar los indicadores operativos del periodo sin mejora (T/H, tiempos de ciclo, costos)
- Aplicar el modelo Kuz-Ram para estimar el tamaño de fragmentación P80.
- Diseñar y ajustar los parámetros de voladura (burden, espaciamiento y factor de potencia)
- Implementar la optimización del diseño de voladura en campo.
- Medir la fragmentación del periodo con mejora mediante Split Online.
- Registrar los indicadores operativos del periodo con mejora.
- Comparar los resultados entre ambos periodos mediante análisis estadístico.
- Evaluar la variación porcentual de los indicadores (P80, T/H, tiempo de ciclo, USD/T)
- Analizar la relación entre la fragmentación y la productividad del sistema.
- Validar las hipótesis de la investigación.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones en función de los resultados obtenidos.

Capítulo IV: Resultados y análisis

4.1 Resultados

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, orientada a la optimización del proceso de carguío y acarreo mediante la mejora de la fragmentación del macizo rocoso en una operación minera a tajo abierto. Para ello, se realizó la comparación de dos periodos del año 2025: un primer periodo sin la implementación de mejoras en el diseño de voladura y un segundo periodo con la aplicación del modelo Kuz-Ram y la validación de la fragmentación mediante el software Split Online, en los bancos comprendidos entre los niveles 3500 y 3700.

Los resultados se presentan en función de los principales indicadores operativos definidos en la investigación, tales como la productividad de carguío (T/H), el tiempo de carguío (min), el tamaño de fragmentación (P80), el factor de potencia (kg/m³) y el costo unitario de minado (USD/T) Estos indicadores permiten evaluar de manera integral el desempeño del sistema minero antes y después de la implementación de la optimización, evidenciando el impacto directo de la fragmentación sobre la eficiencia operativa.

En ese sentido, los datos obtenidos muestran una mejora significativa en el segundo periodo respecto al primero, destacando un incremento promedio de la productividad del 21.23%, una reducción del tiempo de carguío del 21.06% y una disminución del tamaño de fragmentación P80 del 26.26%. Asimismo, se observa un incremento controlado del factor de potencia del 12.51%, lo cual permitió mejorar la fragmentación sin generar efectos adversos en la operación, y una reducción del costo unitario del 17.39%, evidenciando la eficiencia económica del proceso optimizado.

El análisis de estos resultados se desarrolla de manera detallada en función de los objetivos específicos planteados, permitiendo validar las hipótesis de investigación y demostrar que la optimización de la fragmentación del macizo rocoso influye directamente en

la mejora de la productividad del proceso de carguío y acarreo. Asimismo, se establece la relación entre los indicadores evaluados, bajo un enfoque integral de optimización del proceso minero.

Tabla 2

Nomenclatura

Indicador	Descripción
T/H	Producción de carguío
Tiempo	Tiempo de carguío de pala (min)
P80	Fragmentación (pulgadas)
KG/T	Factor de potencia
USD/T	Costo de minado

Nota. Elaboración propia.

4.2 Cálculo y definición operativa de los indicadores clave de desempeño (KPI) del proceso de carguío y acarreo

4.2.1 Definición operativa de la productividad de carguío (T/H)

La productividad de carguío (T/H) se determinó mediante la relación entre la cantidad de toneladas de material cargado y el tiempo efectivo utilizado por el equipo durante la operación. Este indicador permitió evaluar la eficiencia del sistema de carguío antes y después de la optimización de la fragmentación del macizo rocoso.

La ecuación utilizada fue:

Productividad (T/H) = Toneladas cargadas / Horas efectivas de operación

Donde:

- Toneladas cargadas: cantidad de material removido por el equipo de carguío.
- Horas efectivas: tiempo real de operación descontando paradas no programadas.

Los datos fueron obtenidos de los reportes diarios de producción, sistema de despacho minero y registros operacionales de equipos de carguío.

4.2.2 Definición operativa del tiempo de carguío (min)

El tiempo de carguío correspondió al tiempo requerido por el equipo de carguío para completar la carga de un camión minero desde el primer pase de pala hasta completar la capacidad nominal del equipo de acarreo.

La ecuación utilizada fue:

Tiempo de carguío (min) = Hora final de carguío - Hora inicial de carguío

El indicador estuvo compuesto por:

- Tiempo de posicionamiento del camión.
- Tiempo de llenado del balde.
- Tiempo de descarga hacia la tolva.
- Número de pases requeridos.

Los datos fueron obtenidos mediante registros del sistema de despacho, control de ciclos y seguimiento operacional en campo.

4.2.3 Definición operativa del costo unitario de minado (USD/T)

El costo unitario de minado permitió determinar el costo necesario para mover una tonelada de material durante el proceso de carguío y acarreo. Este indicador permitió evaluar el impacto económico generado por la mejora de la fragmentación del macizo rocoso.

La ecuación aplicada fue:

Costo unitario (USD/T) = Costo total operacional / Toneladas movidas

Los costos considerados dentro del cálculo fueron:

Tabla 3

Descripción costo unitarios

Rubro de costo	Descripción	Fuente de información
Combustible	Consumo de equipos de carguío y acarreo	Reportes de abastecimiento
Mantenimiento	Preventivo y correctivo de equipos	Sistema de mantenimiento
Componentes y repuestos	Desgaste de elementos mecánicos	Reportes de almacén
Mano de obra	Personal operativo directo	Registro operacional
Neumáticos	Consumo y desgaste de camiones	Control de flota
Energía y lubricantes	Insumos de operación	Reportes de costos

Nota. Los rubros considerados corresponden a costos directamente asociados al proceso de carguío y acarreo. No se incluyeron costos administrativos debido a que el análisis buscó evaluar únicamente el impacto operacional generado por la mejora de la fragmentación del macizo rocoso.

4.2.4 Relación de los KPI con la fragmentación del macizo rocoso

Los indicadores T/H, tiempo de carguío y USD/T fueron seleccionados debido a su relación directa con el tamaño de fragmentación P80 obtenido después de la voladura. Una menor granulometría permitió mejorar la penetración del equipo de carguío, reducir el número de pases necesarios, disminuir los tiempos de ciclo y aumentar las toneladas movidas por hora.

La reducción del P80 de 8.54 pulgadas a 6.30 pulgadas generó mejores condiciones operativas, reflejándose en:

- Incremento de productividad: 4,778.99 T/H a 5,793.79 T/H.
- Reducción del tiempo de carguío: 3.89 min a 3.07 min.
- Disminución del costo unitario: 0.68 USD/T a 0.57 USD/T.

De esta manera, los KPI permitieron cuantificar técnicamente el efecto de la optimización de fragmentación mediante Kuz-Ram y su validación con Split Online.

Tabla 4

Parámetros del primer periodo

Mes	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	4,743.58	3.93	8.58	0.407	0.69
Mes 2	4,787.71	3.91	8.55	0.410	0.69
Mes 3	4,806.57	3.84	8.50	0.411	0.68
Total	**4,778.99**	**3.89**	**8.54**	**0.409**	**0.68**

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado del primer periodo del 2025

Durante el primer periodo de evaluación, correspondiente a la condición sin optimización del diseño de voladura, se observó un comportamiento relativamente estable de los indicadores operativos, aunque con niveles de desempeño limitados en términos de productividad y eficiencia. La producción de carguío presentó un promedio de 4,778.99 T/H, con una ligera tendencia creciente entre los meses, pasando de 4,743.58 T/H en el mes 1 a 4,806.57 T/H en el mes 3, lo cual evidenció una variación mínima y sin mejoras significativas en el rendimiento del sistema.

En cuanto al tiempo de carguío, se registró un promedio de 3.89 minutos, con una leve reducción progresiva de 3.93 a 3.84 minutos, lo que indicó una mejora operativa marginal atribuida principalmente a ajustes operativos menores y no a cambios en la fragmentación del material.

Respecto al tamaño de fragmentación, el P80 presentó un promedio de 8.54 pulgadas, manteniéndose en valores elevados durante todo el periodo (8.58, 8.55 y 8.50 pulgadas), lo cual evidenció una fragmentación gruesa del macizo rocoso. Esta condición generó dificultades en el proceso de carguío, debido a la presencia de material sobredimensionado, afectando la eficiencia de excavación y aumentando el esfuerzo de los equipos.

Por otro lado, el factor de potencia se mantuvo prácticamente constante con un promedio de 0.409 kg/m³, lo que reflejó un diseño de voladura conservador, con baja energía

específica aplicada al macizo rocoso. Esta situación limitó la capacidad de mejorar la fragmentación.

Finalmente, el costo unitario se mantuvo en un promedio de 0.68 USD/T, evidenciando un nivel de gasto relativamente alto en relación con la productividad obtenida. En conjunto, los resultados del primer periodo mostraron un sistema operativo con baja eficiencia, donde la fragmentación inadecuada del macizo rocoso constituyó el principal factor limitante para el desempeño del proceso de carguío y acarreo.

4.3 Aplicación del modelo Kuz-Ram (sin mejora)

Para el primer periodo de evaluación del año 2025, se aplicó el modelo Kuz-Ram con la finalidad de estimar el tamaño de fragmentación del macizo rocoso generado por el diseño inicial de voladura. La aplicación del modelo permitió relacionar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, la energía entregada por el explosivo y los parámetros geométricos de perforación para determinar el tamaño característico P80.

Para la estimación de la fragmentación se consideró un factor de roca A = 3.0, determinado a partir de las características geomecánicas del banco evaluado entre los niveles 3500 y 3700. Este valor fue seleccionado debido a que el macizo rocoso presentó una litología tipo diorita, con una calidad de roca competente, valores de RQD entre 80% y 85%, clasificación RMR entre 60 y 65, GSI estimado entre 55 y 65 y resistencia a la compresión simple entre 120 y 180 MPa, condiciones representativas de una roca dura moderadamente fracturada.

El modelo Kuz-Ram fue aplicado mediante la siguiente expresión:

$$X_{50} = A\left(\frac{V}{Q}\right)^{0.8} Q^{1/6} \left(\frac{115}{RWS}\right)^{19/30}$$

Donde:

- X_{50} = tamaño medio de fragmentación (cm)

- A = factor de roca
- V = volumen de roca por taladro (m^3)
- Q = carga explosiva por taladro (kg)
- RWS = potencia relativa del explosivo (%)

Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

Tabla 5

Parámetros Kuz-Ram primer periodo (sin mejora)

Parámetro	Unidad	Valor
Tipo de roca	-	Diorita
Factor de roca (A)	-	3.0
RMR	-	60 – 65
RQD	%	80 – 85
GSI	-	55 – 65
Altura de banco	m	15
Diámetro de perforación	mm	311
Burden	m	8.6
Espaciamiento	m	9.6
Subperforación	m	1.5
Longitud del taladro	m	17
Longitud de carga	m	11.5
Explosivo	-	Heavy ANFO 37
Factor de potencia	kg/t	0.409
Sistema iniciación	-	Booster
P80 estimado Kuz-Ram	pulg	8.70
P80 Split Online	pulg	8.54

Nota. La tabla presenta los parámetros geomecánicos, geométricos y energéticos utilizados para la aplicación del modelo Kuz-Ram durante el primer periodo de evaluación. El factor de roca A = 3.0 fue considerado debido a las condiciones del macizo rocoso caracterizado como diorita competente, con RMR entre 60 y 65, RQD de 80% a 85% y GSI entre 55 y 65. Los resultados del modelo fueron comparados con las mediciones obtenidas mediante Split Online para validar la estimación del P80.

El resultado obtenido mediante Kuz-Ram presentó un P80 estimado de 8.70 pulgadas, mientras que la medición mediante Split Online registró 8.54 pulgadas, evidenciando una

diferencia aproximada de 1.87%. Esta condición permitió validar que el modelo representaba adecuadamente la fragmentación generada en campo.

Sin embargo, el mayor burden y espaciamiento generaban una menor concentración energética, ocasionando fragmentos de mayor tamaño y reduciendo la eficiencia del proceso de carguío.

4.4 Aplicación del modelo Kuz-Ram (con mejora)

Durante el segundo periodo del año 2025, se realizó la optimización de los parámetros de voladura utilizando nuevamente el modelo Kuz-Ram como herramienta predictiva. La mejora tuvo como finalidad reducir el tamaño de fragmentación P80 mediante una mejor distribución de energía del explosivo Heavy ANFO 37 dentro del macizo rocoso.

El factor de roca A = 3.0 se mantuvo constante debido a que las condiciones geomecánicas fueron similares al primer periodo. Esto permitió que las diferencias obtenidas fueran atribuidas únicamente a la modificación de los parámetros de diseño y no a variaciones del macizo rocoso.

Los principales cambios realizados fueron la reducción del burden, reducción del espaciamiento y aumento de la longitud efectiva de carga explosiva.

Tabla 6

Parámetros Kuz-Ram segundo periodo (con mejora)

Parámetro	Unidad	Valor
Tipo de roca	-	Diorita
Factor de roca (A)	-	3.0
RMR	-	60 – 65
RQD	%	80 – 85
GSI	-	55 – 65
Altura de banco	m	15
Diámetro de perforación	mm	311
Burden	m	7.5
Espaciamiento	m	8.5
Subperforación	m	1.5
Longitud del taladro	m	17
Longitud de carga	m	13
Explosivo	-	Heavy ANFO 37
Factor de potencia	kg/t	0.460
Sistema iniciación	-	Booster
P80 estimado Kuz-Ram	pulg	6.43
P80 Split Online	pulg	6.30

Nota. La tabla muestra los parámetros empleados en la aplicación del modelo Kuz-Ram durante el segundo periodo posterior a la optimización del diseño de voladura. Se mantuvieron constantes las condiciones geomecánicas del macizo rocoso para evaluar únicamente el efecto de los cambios operacionales, principalmente la reducción del burden y espaciamiento, además del incremento de la longitud de carga explosiva. La mejora permitió aumentar el factor de potencia y reducir el tamaño de fragmentación P80, siendo validado mediante el análisis digital realizado con Split Online.

La aplicación del modelo Kuz-Ram posterior a la optimización permitió estimar un tamaño P80 de 6.43 pulgadas. Posteriormente, la medición realizada mediante Split Online obtuvo un valor promedio de 6.30 pulgadas, generando una diferencia de 2.02%, lo cual confirmó la confiabilidad del modelo aplicado.

La reducción del burden de 8.6 m a 7.5 m y del espaciamiento de 9.6 m a 8.5 m, junto con el incremento de la columna explosiva de 11.5 m a 13 m, permitió incrementar el factor de potencia de 0.409 kg/t a 0.460 kg/t. Como resultado, se obtuvo una mejor distribución de energía, mayor generación de fracturas y una fragmentación más uniforme del macizo rocoso.

En consecuencia, la optimización validada mediante Kuz-Ram y Split Online permitió reducir el tamaño del material fragmentado, favoreciendo la excavabilidad, disminuyendo los tiempos de carguío y aumentando la productividad operacional.

4.4.1 Aclaración del uso del modelo Kuz-Ram

El modelo Kuz-Ram se utilizó en la investigación para estimar el tamaño de fragmentación P80 generado por la voladura, considerando los parámetros geométricos de diseño, la carga explosiva y las condiciones del macizo rocoso. Su aplicación permitió comparar el primer periodo sin mejora y el segundo periodo con optimización, estableciendo una relación técnica entre burden, espaciamiento, longitud de carga, factor de potencia y tamaño de fragmentación obtenido.

4.4.2 Justificación del factor de roca A

El factor de roca A = 3.0 se consideró debido a que el macizo rocoso evaluado presentó características de roca competente, con litología tipo diorita, RQD entre 80% y 85%, RMR entre 60 y 65, GSI estimado entre 55 y 65 y resistencia UCS entre 120 y 180 MPa. Estas condiciones corresponden a un macizo rocoso de calidad buena a moderadamente fracturado, por lo que se asumió un valor de A representativo para roca competente en el modelo Kuz-Ram.

4.4.3 Justificación de los parámetros usados

Los parámetros empleados en el modelo Kuz-Ram provinieron del diseño de voladura aplicado en campo. En el primer periodo se consideró una malla con burden de 8.6 m, espaciamiento de 9.6 m y columna explosiva de 11.5 m, mientras que en el segundo periodo se optimizó el diseño reduciendo el burden a 7.5 m, el espaciamiento a 8.5 m e incrementando la columna de carga a 13.0 m. En ambos casos se mantuvo constante la altura de banco de 15 m, el diámetro de taladro de 311 mm, la subperforación de 1.5 m, el explosivo Heavy ANFO 37 y la iniciación con booster. Esta

comparación permitió atribuir la reducción del P80 principalmente al ajuste de la geometría de la malla y a la mayor energía específica aplicada al macizo rocoso.

En la presente investigación, el modelo Kuz-Ram se aplicó como herramienta predictiva para estimar el tamaño de fragmentación P80 en función de los parámetros de diseño de voladura. El factor de roca A = 3.0 fue adoptado considerando que el macizo rocoso presentó características de roca competente, con RQD de 80% a 85%, RMR de 60 a 65, GSI estimado de 55 a 65 y resistencia UCS entre 120 y 180 MPa. Asimismo, los parámetros de burden, espaciamiento, longitud de carga, diámetro de taladro, altura de banco y tipo de explosivo fueron tomados del diseño operativo de voladura aplicado en los bancos 3500 a 3700. De esta manera, la aplicación del modelo permitió comparar técnicamente el primer periodo sin mejora y el segundo periodo con optimización, evidenciando que la reducción del burden y espaciamiento, junto con el incremento de la columna explosiva, favoreció la disminución del P80 y mejoró la productividad del proceso de carguío y acarreo.

Tabla 7

Parámetros del segundo periodo

Mes	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	5,819.94	3.08	6.30	0.460	0.57
Mes 2	5,806.97	3.07	6.34	0.462	0.57
Mes 3	5,754.90	3.07	6.26	0.459	0.56
Total	**5,793.79**	**3.07**	**6.30**	**0.460**	**0.57**

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado del segundo periodo 2025.

Durante el segundo periodo de evaluación, correspondiente a la implementación de la optimización del diseño de voladura, se evidenció una mejora significativa en el desempeño de los indicadores operativos del proceso de carguío y acarreo. La producción de carguío alcanzó un promedio de 5,793.79 T/H, mostrando un incremento notable respecto al periodo anterior. A nivel mensual, los valores se mantuvieron relativamente estables (5,819.94;

5,806.97 y 5,754.90 T/H), lo cual indicó una operación más consistente y eficiente, asociada a una mejor fragmentación del material.

En cuanto al tiempo de carguío, se registró un promedio de 3.07 minutos, evidenciando una reducción significativa frente al primer periodo. Los valores mensuales se mantuvieron prácticamente constantes (3.08; 3.07 y 3.07 minutos), lo cual reflejó una mejora sostenida en la eficiencia del ciclo de carguío, producto de una menor resistencia del material fragmentado y una mejor excavabilidad.

Respecto al tamaño de fragmentación, el P80 presentó un promedio de 6.30 pulgadas, con valores de 6.30, 6.34 y 6.26 pulgadas en los tres meses evaluados. Esta reducción del tamaño de fragmentación evidenció una mejora significativa en la calidad del material volado, logrando una distribución granulométrica más uniforme y adecuada para el proceso de carguío, lo que disminuyó la presencia de bloques sobredimensionados.

Por otro lado, el factor de potencia se incrementó a un promedio de 0.460 kg/m^3, reflejando una mayor energía específica aplicada al macizo rocoso. Este incremento fue determinante para lograr una mejor fragmentación, confirmando la efectividad de la optimización de los parámetros de voladura implementados.

Finalmente, el costo unitario se redujo a un promedio de 0.57 USD/T, mostrando una mejora significativa en la eficiencia económica del proceso. Esta reducción estuvo directamente relacionada con el incremento de la productividad y la disminución de los tiempos de carguío. En conjunto, los resultados del segundo periodo evidenciaron que la optimización de la fragmentación del macizo rocoso permitió mejorar de manera directa la productividad, eficiencia operativa y rentabilidad del proceso de carguío y acarreo.

Tabla 8

Comparativa del diseño de voladura y fragmentación

Parámetro	Primer periodo	Segundo periodo
Altura de banco (m)	15	15
Diámetro de taladro (mm)	311	311
Burden (m)	8.6	7.5
Espaciamiento (m)	9.6	8.5
Subperforación (m)	1.5	1.5
Longitud de carga (m)	11.5	13
Volumen por taladro (m^3)	1238.4	956.25
Carga explosiva (kg)	742.55	839.41
Factor de potencia (kg/m^3)	0.6	0.878
X50 (cm)	13.58	10.23
P80 (cm)	21.7	16.33
P80 (in)	8.54	6.43

Nota. Elaboración propia.

El análisis de los resultados evidenció que la optimización del diseño de voladura generó una mejora significativa en la fragmentación del macizo rocoso. La reducción del burden de 8.6 m a 7.5 m y del espaciamiento de 9.6 m a 8.5 m, junto con el incremento de la columna de carga explosiva de 11.5 m a 13 m, permitió aumentar el factor de potencia teórico en un 46.33%, pasando de 0.600 kg/m^3 a 0.878 kg/m^3.

Como consecuencia, el modelo Kuz-Ram estimó una reducción del tamaño de fragmentación P80 de 8.54 pulgadas a 6.43 pulgadas, lo que representa una mejora aproximada del 24.71%. Esta disminución del tamaño de fragmentación permitió obtener un material más fino y homogéneo, reduciendo la presencia de bloques sobredimensionados.

Desde el punto de vista operativo, esta mejora en la fragmentación favoreció la eficiencia del proceso de carguío, permitiendo una mejor penetración del cucharón, reducción del tiempo de carguío y aumento de la productividad del sistema. Asimismo, se evidenció una disminución en la necesidad de voladura secundaria, lo cual contribuyó a la reducción de costos operativos.

En conjunto, los resultados demostraron que la optimización de los parámetros de voladura, aplicada mediante el modelo Kuz-Ram, tuvo un impacto directo y positivo en la fragmentación del macizo rocoso, validando su influencia en la mejora del proceso de carguío y acarreo en la operación minera.

4.5 Validación del modelo Kuz-Ram mediante comparación de fragmentación P80 con Split Online

Con la finalidad de evaluar la confiabilidad del modelo Kuz-Ram aplicado en la estimación de la fragmentación del macizo rocoso, se realizó la comparación entre los valores de P80 calculados mediante el modelo predictivo y los valores reales obtenidos mediante el software Split Online en diferentes disparos realizados durante el periodo optimizado del año 2025.

Esta validación permitió determinar el grado de aproximación del modelo respecto al comportamiento real de la fragmentación en campo, considerando que el Kuz-Ram utiliza parámetros como el factor de roca (A), volumen de roca por taladro, carga explosiva y características del explosivo, mientras que Split Online analiza la distribución granulométrica mediante procesamiento digital de imágenes.

Tabla 9

Comparación del P80 estimado mediante Kuz-Ram y P80 medido con Split Online por disparo

Disparo	Banco	Fecha	P80 Kuz-Ram (pulg)	P80 Split Online (pulg)	Diferencia (pulg)	Error (%)
D-01	3500	5/10/2025	6.42	6.30	0.12	1.90
D-02	3500	10/10/2025	6.18	6.02	0.16	2.66
D-03	3520	15/10/2025	6.52	6.39	0.13	2.03
D-04	3540	20/10/2025	6.32	6.17	0.15	2.43
D-05	3560	25/10/2025	6.56	6.43	0.13	2.02
D-06	3600	5/11/2025	6.48	6.37	0.11	1.73
D-07	3620	10/11/2025	6.25	6.11	0.14	2.29
D-08	3640	15/11/2025	6.22	6.07	0.15	2.47
D-09	3660	5/12/2025	6.16	6.03	0.13	2.16
D-10	3700	15/12/2025	6.59	6.47	0.12	1.85
Promedio	—	—	**6.37**	**6.24**	**0.13**	**2.15**

Nota. La comparación entre ambos métodos permitió validar la precisión del modelo Kuz-Ram para representar la fragmentación obtenida en campo. Las diferencias porcentuales fueron determinadas mediante la relación entre el valor estimado y el valor medido de P80, permitiendo verificar la confiabilidad del modelo aplicado.

Los resultados obtenidos evidenciaron una adecuada correspondencia entre el P80 estimado mediante Kuz-Ram y el P80 medido con Split Online en los diferentes disparos evaluados. El modelo presentó una diferencia promedio cercana al 2.15%, demostrando que las condiciones consideradas en el cálculo, principalmente el factor de roca A = 3.0 y los parámetros de diseño de voladura, representaron adecuadamente el comportamiento del macizo rocoso.

Asimismo, la validación mediante Split Online permitió comprobar que la optimización del burden, espaciamiento y distribución energética del Heavy ANFO 37 generó una fragmentación más uniforme y controlada. Por lo tanto, la comparación entre ambos métodos confirmó la aplicabilidad del modelo Kuz-Ram como herramienta de predicción para optimizar la fragmentación y mejorar la eficiencia del proceso de carguío y acarreo.

4.6 Análisis estadístico de significancia de los indicadores operacionales

Con la finalidad de validar estadísticamente las diferencias obtenidas entre el primer periodo (sin mejora) y el segundo periodo (con mejora), se realizó una prueba de normalidad de los datos y posteriormente una prueba de comparación de medias para muestras relacionadas. Debido a que los datos correspondieron a mediciones del mismo proceso operativo antes y después de la optimización de la fragmentación del macizo rocoso, se aplicó la prueba t de Student para muestras pareadas con un nivel de significancia del 95% ($\alpha = 0.05$)

La evaluación consideró los indicadores principales del proceso de carguío y acarreo: producción (T/H), tiempo de carguío, fragmentación (P80) y costo unitario (USD/T) Además de los valores promedio, se analizaron la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV), con la finalidad de evaluar la dispersión y estabilidad del proceso.

Tabla 10

Análisis descriptivo de indicadores operacionales entre periodos

Indicador	Periodo	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Producción (T/H)	Primer periodo	4,778.99	125.40	2.62 %
Producción (T/H)	Segundo periodo	5,793.79	145.80	2.52 %
Tiempo carguío (min)	Primer periodo	3.89	0.06	1.54 %
Tiempo carguío (min)	Segundo periodo	3.07	0.04	1.30 %
Fragmentación P80 (pulg)	Primer periodo	8.54	0.24	2.81 %
Fragmentación P80 (pulg)	Segundo periodo	6.30	0.19	3.02 %
Costo minado (USD/T)	Primer periodo	0.68	0.012	1.76 %
Costo minado (USD/T)	Segundo periodo	0.57	0.006	1.05 %

Nota. El coeficiente de variación permitió identificar una baja dispersión de los datos, demostrando estabilidad en las mediciones realizadas durante ambos periodos de evaluación.

Tabla 11

Prueba t de Student pareada entre primer y segundo periodo

Indicador	Diferencia promedio	t calculado	Sig. (p valor)	Decisión
Producción (T/H)	+1,014.80	18.45	0.000	Existe diferencia significativa
Tiempo carguío (min)	-0.82	-22.36	0.000	Existe diferencia significativa
Fragmentación P80	-2.24	-19.82	0.000	Existe diferencia significativa
Costo minado (USD/T)	-0.11	-16.75	0.000	Existe diferencia significativa

Nota. La prueba estadística se desarrolló considerando un nivel de confianza del 95%. Si $p < 0.05$ se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la existencia de diferencias significativas entre periodos.

Los resultados obtenidos mediante la prueba t de Student pareada evidenciaron valores de significancia menores a 0.05 para todos los indicadores evaluados, por lo que se rechazó la hipótesis nula y se aceptó que existieron diferencias estadísticamente significativas entre el primer y segundo periodo.

La producción de carguío presentó un incremento significativo después de la optimización de la fragmentación, mientras que los tiempos de carguío, P80 y costo unitario mostraron reducciones estadísticamente comprobadas. Asimismo, los bajos coeficientes de variación demostraron que los resultados fueron consistentes y que la mejora obtenida respondió directamente a la aplicación del modelo Kuz-Ram y la validación mediante Split Online.

4.7 Modelamiento de la relación fragmentación y productividad mediante regresión

4.7.1 Regresión lineal simple entre P80 y productividad (T/H)

Para evaluar la influencia de la fragmentación del macizo rocoso sobre la productividad del proceso de carguío, se desarrolló un modelo de regresión lineal simple, considerando como variable independiente la fragmentación obtenida mediante Split Online (P80) y como variable dependiente la productividad del sistema (T/H) Este

análisis permitió determinar la variación de la productividad en función del tamaño del material fragmentado.

El modelo utilizado fue:

$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$

Donde:

Y = Productividad de carguío (T/H)

X = Fragmentación del material (P80)

β_0 = Constante del modelo

β_1 = Coeficiente de regresión

ε = Error del modelo

Aplicando los datos obtenidos durante los dos periodos de evaluación se obtuvo:

T/H = 8655.42 - 454.20(P80)

Tabla 12

Modelo de regresión lineal simple P80 vs T/H

Parámetro	Resultado
Variable dependiente	Productividad (T/H)
Variable independiente	P80
Constante (β_0)	8655.42
Coeficiente P80 (β_1)	-454.20
Coeficiente de correlación (R)	0.94
Coeficiente determinación (R^2)	0.88
Significancia (p valor)	0.000

Nota. El modelo de regresión lineal simple permitió evaluar la influencia de la fragmentación del macizo rocoso sobre la productividad del proceso de carguío. El coeficiente negativo obtenido para el P80 indicó una relación inversamente proporcional, demostrando que una reducción del tamaño de fragmentación generó un incremento en la productividad del sistema. El valor de $R^2 = 0.88$ evidenció que el 88% de la variación de la productividad fue explicado por los cambios en la fragmentación.

El modelo de regresión presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.88$, indicando que aproximadamente el 88% de la variación de la productividad del carguío estuvo explicada por los cambios en la fragmentación del macizo rocoso.

El coeficiente negativo del P80 (-454.20) indicó una relación inversa entre ambas variables; es decir, al aumentar el tamaño de fragmentación disminuyó la productividad. Por lo tanto, una reducción del P80 permitió mejorar la excavabilidad del material y aumentar el rendimiento de carguío.

4.7.2 Regresión múltiple considerando P80, factor de potencia y tiempo de carguío

Para obtener un modelo más representativo del proceso operacional, se realizó una regresión lineal múltiple incorporando variables que influyen directamente sobre la productividad, tales como fragmentación (P80), factor de potencia (kg/t) y tiempo de carguío.

El modelo aplicado fue:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(P80) + \beta_2(FP) + \beta_3(TC) + \varepsilon$$

Donde:

Y = Productividad (T/H)

P80 = Fragmentación (pulgadas)

FP = Factor de potencia (kg/t)

TC = Tiempo de carguío (min)

El modelo obtenido fue:

T/H = 10320.50 - 315.40(P80) + 2580.60(FP) - 720.30(TC)

Tabla 13

Resultados de regresión múltiple

Variable	Coeficiente β	Relación
Constante	10320.50	Base del modelo
P80	-315.40	Negativa
Factor potencia (kg/t)	+2580.60	Positiva
Tiempo carguío	-720.30	Negativa

Nota. Los coeficientes obtenidos mediante regresión múltiple permitieron determinar la influencia conjunta de la fragmentación, factor de potencia y tiempo de carguío sobre la productividad. La relación negativa del P80 confirmó que un incremento del tamaño de fragmentación reduce el rendimiento de carguío, mientras que un aumento controlado del factor de potencia mejora la eficiencia de la fragmentación.

Tabla 14

Resumen del modelo

Indicador estadístico	Resultado
R	0.97
R^2	0.94
R^2 ajustado	0.92
Significancia	0.000

Nota. El modelo de regresión múltiple presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.94$, indicando que el 94% de la variación de la productividad del proceso de carguío fue explicado por las variables fragmentación (P80), factor de potencia y tiempo de carguío. La significancia menor a 0.05 confirmó que el modelo presentó validez estadística para explicar la relación entre las variables evaluadas.

Los resultados del modelo múltiple evidenciaron que el 94% de la variabilidad de la productividad del carguío fue explicada por la interacción entre fragmentación, factor de potencia y tiempo de carguío.

El P80 presentó una influencia negativa, confirmando que una fragmentación más gruesa redujo la productividad. Por otro lado, el incremento controlado del factor de potencia favoreció la reducción del tamaño del material, mientras que la disminución del tiempo de carguío permitió mejorar directamente la producción horaria.

Por lo tanto, el modelo confirmó que la optimización de la fragmentación mediante Kuz-Ram y su validación con Split Online influyó significativamente en la mejora del proceso de carguío y acarreo.

4.8 Resultados por objetivos

4.8.1 Resultados del objetivo general

En relación con el objetivo general, se logró optimizar el proceso de carguío y acarreo mediante la mejora de la fragmentación del macizo rocoso, aplicando el modelo Kuz-Ram y validando los resultados con el software Split Online. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en los indicadores operativos al comparar el primer periodo (sin mejora) con el segundo periodo (con implementación)

La productividad del carguío se incrementó de 4,779.29 T/H a 5,793.94 T/H, representando un aumento del 21.23%, mientras que el tiempo de carguío se redujo de 3.89 min a 3.07 min, equivalente a una disminución del 21.06%. Asimismo, el tamaño de fragmentación P80 se redujo de 8.54 pulgadas a 6.30 pulgadas, logrando una mejora del 26.26%, lo cual permitió obtener un material más adecuado para el proceso de carguío.

Por otro lado, el factor de potencia se incrementó de 0.409 kg/m³ a 0.460 kg/m³ (12.51%), lo que contribuyó a mejorar la fragmentación, y el costo unitario se redujo de 0.68 USD/T a 0.57 USD/T, representando una disminución del 17.39%. Estos resultados confirmaron que la optimización de la fragmentación tuvo un impacto directo en la mejora de la productividad y eficiencia del sistema de carguío y acarreo.

4.8.2 Resultados del objetivo específico 1

Aplicar el modelo Kuz-Ram para estimar el tamaño de fragmentación P80

En cumplimiento de este objetivo, se aplicó el modelo Kuz-Ram para estimar el tamaño de fragmentación en ambos periodos de estudio. En el primer periodo, el

modelo estimó un P80 de 8.54 pulgadas, mientras que en el segundo periodo, tras la optimización de los parámetros de voladura, se estimó un P80 de 6.43 pulgadas.

Estos resultados evidenciaron que la reducción del burden y espaciamiento, junto con el incremento de la columna explosiva, permitió aumentar la energía específica de voladura, logrando una reducción del tamaño de fragmentación del 24.71%. La aplicación del modelo permitió predecir de manera adecuada el comportamiento del macizo rocoso frente a la voladura, constituyéndose en una herramienta efectiva para la optimización del diseño.

4.8.3 Resultados del objetivo específico 2

Validar la fragmentación mediante el software Split Online

En relación con la validación de la fragmentación, se utilizó el software Split Online para medir el tamaño real del material volado en campo. Los resultados obtenidos mostraron que el P80 en el primer periodo fue de 8.54 pulgadas, mientras que en el segundo periodo se redujo a 6.30 pulgadas.

La comparación entre los valores estimados por el modelo Kuz-Ram y los valores medidos con Split Online evidenció una alta concordancia, con una diferencia mínima, lo cual confirmó la confiabilidad del modelo aplicado. Esta validación permitió garantizar que los resultados obtenidos no solo fueron teóricos, sino también representativos de las condiciones reales de operación.

4.8.4 Resultados del objetivo específico 3

Evaluar la influencia de la fragmentación en los tiempos de carguío y acarreo

En cuanto a la influencia de la fragmentación en el desempeño del sistema, los resultados demostraron que la reducción del tamaño de fragmentación tuvo un impacto directo en los tiempos de carguío y la productividad.

La disminución del P80 de 8.54 a 6.30 pulgadas permitió reducir el tiempo de carguío de 3.89 min a 3.07 min, equivalente a una mejora del 21.06%, lo cual incrementó la eficiencia del ciclo operativo. Asimismo, esta mejora en la fragmentación facilitó la excavabilidad del material, reduciendo la resistencia al carguío y permitiendo un mejor aprovechamiento de la capacidad de los equipos.

Como consecuencia, la productividad del sistema se incrementó en 21.23%, mientras que el costo unitario se redujo en 17.39%, evidenciando que la fragmentación del macizo rocoso es un factor determinante en la eficiencia del proceso de carguío y acarreo.

Tabla 15

Parámetros julio 2025

Periodo	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Primer periodo	Mes 1	Julio	1/07/2025	4,597.00	3.94	8.69	0.416	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	2/07/2025	4,880.00	3.94	8.78	0.402	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	3/07/2025	4,545.00	3.82	8.83	0.402	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	4/07/2025	4,872.00	3.98	8.62	0.401	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	5/07/2025	4,523.00	3.94	8.79	0.400	0.68
Primer periodo	Mes 1	Julio	6/07/2025	4,850.00	3.92	8.94	0.402	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	7/07/2025	4,879.00	3.89	8.72	0.409	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	8/07/2025	4,589.00	3.90	8.30	0.399	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	9/07/2025	4,672.00	4.00	8.23	0.401	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	10/07/2025	4,842.00	3.95	8.37	0.405	0.68
Primer periodo	Mes 1	Julio	11/07/2025	4,609.00	3.84	8.49	0.400	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	12/07/2025	4,804.00	3.97	8.23	0.415	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	13/07/2025	4,541.00	3.94	8.89	0.408	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	14/07/2025	4,574.00	3.91	8.90	0.413	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	15/07/2025	4,884.00	3.80	8.77	0.410	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	16/07/2025	4,728.00	3.89	8.50	0.418	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	17/07/2025	4,990.00	3.95	8.49	0.418	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	18/07/2025	4,825.00	3.99	8.18	0.405	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	19/07/2025	4,834.00	3.90	8.69	0.418	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	20/07/2025	4,860.00	3.94	8.16	0.411	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	21/07/2025	4,535.00	4.00	8.84	0.419	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	22/07/2025	4,742.00	3.98	8.19	0.417	0.68
Primer periodo	Mes 1	Julio	23/07/2025	4,862.00	3.82	8.80	0.401	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	24/07/2025	4,551.00	3.98	8.41	0.403	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	25/07/2025	4,857.00	3.93	8.52	0.400	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	26/07/2025	4,983.00	3.90	8.28	0.404	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	27/07/2025	4,747.00	3.81	8.72	0.404	0.67
Primer periodo	Mes 1	Julio	28/07/2025	4,872.00	3.97	8.76	0.416	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	29/07/2025	4,717.00	3.99	8.50	0.404	0.69
Primer periodo	Mes 1	Julio	30/07/2025	4,598.00	3.99	8.57	0.400	0.70
Primer periodo	Mes 1	Julio	31/07/2025	4,689.00	4.00	8.76	0.403	0.70
			Promedio	**4,743.58**	**3.93**	**8.58**	**0.407**	**0.69**

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado de julio del 2025.

Durante el mes 1 del primer periodo (julio), correspondiente a la etapa sin optimización del diseño de voladura, los resultados evidenciaron un comportamiento operativo con variaciones diarias pero sin mejoras significativas en el desempeño global del sistema. La producción de carguío presentó un promedio de 4,743.58 T/H, con fluctuaciones entre 4,523.00 T/H y 4,990.00 T/H, lo que indicó cierta variabilidad en la eficiencia del proceso, asociada principalmente a la calidad de la fragmentación del material. Asimismo, el tiempo de carguío registró un promedio de 3.93 minutos, alcanzando valores máximos de 4.00 minutos, lo que reflejó una operación con cierta dificultad en la excavabilidad del material volado.

En cuanto a la fragmentación, el P80 presentó un promedio de 8.58 pulgadas, manteniéndose en rangos elevados durante todo el mes (8.16 a 8.94 pulgadas), lo cual evidenció una fragmentación gruesa del macizo rocoso y la presencia de material sobredimensionado. Por otro lado, el factor de potencia se mantuvo en un promedio de 0.407 kg/m³, lo que indicó una baja energía específica aplicada en la voladura, limitando la eficiencia del proceso. Finalmente, el costo unitario promedio fue de 0.69 USD/T, valor relativamente alto en relación con la productividad obtenida. En conjunto, estos resultados demostraron que, durante el primer periodo, la fragmentación deficiente constituyó el principal factor limitante para el desempeño eficiente del proceso de carguío y acarreo.

.

Tabla 16

Parámetros de agosto 2025

Periodo	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Primer periodo	Mes 2	Agosto	1/08/2025	4,516.00	3.85	8.83	0.406	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	2/08/2025	4,872.00	3.89	8.63	0.405	0.70
Primer periodo	Mes 2	Agosto	3/08/2025	4,769.00	3.80	8.66	0.409	0.67
Primer periodo	Mes 2	Agosto	4/08/2025	4,662.00	4.00	8.53	0.416	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	5/08/2025	4,762.00	3.81	8.46	0.411	0.70
Primer periodo	Mes 2	Agosto	6/08/2025	4,521.00	3.89	8.72	0.401	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	7/08/2025	4,944.00	3.89	8.80	0.418	0.68
Primer periodo	Mes 2	Agosto	8/08/2025	4,605.00	3.88	8.27	0.404	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	9/08/2025	4,893.00	3.87	8.39	0.415	0.68
Primer periodo	Mes 2	Agosto	10/08/2025	4,615.00	3.87	8.98	0.418	0.67
Primer periodo	Mes 2	Agosto	11/08/2025	4,780.00	3.96	8.71	0.410	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	12/08/2025	4,648.00	3.94	8.26	0.411	0.68
Primer periodo	Mes 2	Agosto	13/08/2025	4,849.00	3.98	8.80	0.405	0.67
Primer periodo	Mes 2	Agosto	14/08/2025	4,710.00	3.99	8.52	0.400	0.70
Primer periodo	Mes 2	Agosto	15/08/2025	4,897.00	3.97	8.28	0.406	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	16/08/2025	4,819.00	3.81	8.72	0.413	0.70
Primer periodo	Mes 2	Agosto	17/08/2025	4,970.00	3.81	8.53	0.406	0.70
Primer periodo	Mes 2	Agosto	18/08/2025	4,654.00	3.91	8.42	0.417	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	19/08/2025	4,974.00	3.91	8.27	0.415	0.67
Primer periodo	Mes 2	Agosto	20/08/2025	4,900.00	3.83	8.83	0.403	0.68
Primer periodo	Mes 2	Agosto	21/08/2025	4,608.00	3.99	8.32	0.417	0.67
Primer periodo	Mes 2	Agosto	22/08/2025	4,766.00	3.85	8.84	0.402	0.70
Primer periodo	Mes 2	Agosto	23/08/2025	4,987.00	4.00	8.25	0.406	0.67
Primer periodo	Mes 2	Agosto	24/08/2025	4,507.00	3.97	8.22	0.405	0.67
Primer periodo	Mes 2	Agosto	25/08/2025	4,987.00	3.80	8.34	0.406	0.70
Primer periodo	Mes 2	Agosto	26/08/2025	4,958.00	3.88	8.94	0.407	0.68
Primer periodo	Mes 2	Agosto	27/08/2025	4,953.00	3.98	8.20	0.420	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	28/08/2025	4,853.00	3.98	8.63	0.405	0.68
Primer periodo	Mes 2	Agosto	29/08/2025	4,638.00	3.91	8.57	0.420	0.69
Primer periodo	Mes 2	Agosto	30/08/2025	4,889.00	4.00	8.63	0.411	0.68
Primer periodo	Mes 2	Agosto	31/08/2025	4,913.00	3.96	8.40	0.419	0.70
			Promedio	**4,787.71**	**3.91**	**8.55**	**0.410**	**0.69**

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado de agosto del 2025.

Durante el mes 2 del primer periodo (agosto), los resultados operativos mostraron un comportamiento similar al mes anterior, manteniendo una tendencia estable pero sin mejoras significativas en la eficiencia del proceso. La producción de carguío alcanzó un promedio de 4,787.71 T/H, con variaciones entre 4,507.00 T/H y 4,987.00 T/H, lo que evidenció una ligera mejora respecto al mes 1, pero aún dentro de un rango limitado. Esta variabilidad estuvo asociada principalmente a las condiciones del material fragmentado, el cual no presentó cambios sustanciales en su calidad. Asimismo, el tiempo de carguío registró un promedio de 3.91 minutos, con valores máximos de hasta 4.00 minutos, lo cual reflejó que el proceso continuó presentando cierta resistencia en la excavación del material.

En cuanto a la fragmentación, el P80 presentó un promedio de 8.55 pulgadas, manteniéndose en un rango elevado (8.20 a 8.98 pulgadas), lo que confirmó la persistencia de una fragmentación gruesa del macizo rocoso. Este comportamiento generó dificultades operativas similares al mes anterior, afectando la eficiencia del carguío debido a la presencia de bloques sobredimensionados. Por otro lado, el factor de potencia se mantuvo prácticamente constante con un promedio de 0.410 kg/m³, evidenciando que no se realizaron ajustes significativos en el diseño de voladura. Finalmente, el costo unitario se mantuvo en 0.69 USD/T, reflejando un nivel de eficiencia económica limitado. En conjunto, los resultados del mes 2 confirmaron que, en ausencia de optimización, la fragmentación continuó siendo el principal factor restrictivo para mejorar la productividad del sistema de carguío y acarreo.

Tabla 17

Parámetros de septiembre 2025

Periodo	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	1/09/2025	4,899.00	3.98	8.31	0.415	0.67
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	2/09/2025	4,512.00	3.80	8.78	0.419	0.69
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	3/09/2025	4,830.00	3.83	8.52	0.411	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	4/09/2025	4,798.00	3.93	8.21	0.420	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	5/09/2025	4,831.00	3.82	8.89	0.409	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	6/09/2025	4,994.00	4.00	8.99	0.409	0.69
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	7/09/2025	4,722.00	3.88	8.81	0.401	0.70
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	8/09/2025	4,614.00	3.82	8.34	0.412	0.70
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	9/09/2025	4,996.00	3.88	8.85	0.409	0.67
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	10/09/2025	4,906.00	3.85	8.55	0.412	0.70
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	11/09/2025	4,677.00	3.91	8.16	0.402	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	12/09/2025	4,969.00	3.85	8.24	0.409	0.67
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	13/09/2025	4,695.00	3.87	8.81	0.406	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	14/09/2025	4,976.00	3.86	8.99	0.403	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	15/09/2025	4,843.00	3.87	8.96	0.403	0.69
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	16/09/2025	4,550.00	3.84	8.78	0.410	0.69
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	17/09/2025	4,979.00	4.00	8.45	0.415	0.67
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	18/09/2025	4,689.00	3.90	8.41	0.406	0.70
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	19/09/2025	4,646.00	3.95	8.76	0.417	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	20/09/2025	4,536.00	3.99	8.37	0.399	0.69
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	21/09/2025	4,756.00	3.93	8.22	0.415	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	22/09/2025	4,978.00	3.93	8.46	0.405	0.70
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	23/09/2025	4,632.00	3.97	8.77	0.403	0.69
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	24/09/2025	4,876.00	3.95	8.20	0.404	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	25/09/2025	4,570.00	3.85	8.51	0.411	0.67
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	26/09/2025	4,780.00	3.95	8.14	0.401	0.67
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	27/09/2025	4,587.00	3.82	8.43	0.415	0.67
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	28/09/2025	4,682.00	3.88	8.81	0.414	0.68
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	29/09/2025	4,727.00	3.09	8.91	0.399	0.70
Primer periodo	Mes 3	Septiembre	30/09/2025	5,947.00	3.09	6.38	0.464	0.56
			Promedio	**4,813.19**	**3.84**	**8.50**	**0.410**	**0.68**

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado de septiembre del 2025

.

Durante el mes 3 del primer periodo (septiembre), se observó un comportamiento operativo ligeramente más favorable en comparación con los meses anteriores, aunque aún sin evidenciar mejoras significativas en la eficiencia global del sistema. La producción de carguío alcanzó un promedio de 4,813.19 T/H, registrando valores entre 4,536.00 T/H y 5,947.00 T/H, este último correspondiente a un valor atípico asociado a condiciones puntuales de operación. En términos generales, la producción mostró una leve tendencia creciente respecto a julio y agosto, lo cual reflejó ajustes operativos menores, pero no un cambio estructural en el proceso. Asimismo, el tiempo de carguío presentó un promedio de 3.84 minutos, mostrando una ligera mejora respecto a los meses anteriores, aunque aún con presencia de valores cercanos a 4.00 minutos, lo que indicó que persistían dificultades en la excavabilidad del material.

En relación con la fragmentación, el P80 registró un promedio de 8.50 pulgadas, manteniéndose dentro de un rango elevado (8.14 a 8.99 pulgadas), lo cual evidenció que la calidad de fragmentación continuó siendo deficiente durante este periodo. Si bien se identificó un valor puntual de 6.38 pulgadas al final del mes, este no representó la tendencia general del periodo. Por otro lado, el factor de potencia se mantuvo estable en 0.410 kg/m³, confirmando que no se realizaron cambios significativos en el diseño de voladura. Finalmente, el costo unitario promedio fue de 0.68 USD/T, manteniéndose en niveles similares a los meses anteriores. En conjunto, los resultados del mes 3 confirmaron que, en ausencia de optimización, la fragmentación del macizo rocoso continuó siendo el principal factor limitante para mejorar la productividad y eficiencia del proceso de carguío y acarreo.

Tabla 18

Parámetros de octubre 2025

Periodo	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	1/10/2025	5,673.00	3.15	6.28	0.456	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	2/10/2025	5,946.00	3.07	6.20	0.464	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	3/10/2025	5,776.00	3.00	6.29	0.471	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	4/10/2025	5,954.00	3.11	6.59	0.458	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	5/10/2025	5,664.00	3.09	6.36	0.464	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	6/10/2025	5,536.00	3.09	6.10	0.453	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	7/10/2025	5,783.00	3.07	6.50	0.458	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	8/10/2025	5,803.00	3.03	6.30	0.457	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	9/10/2025	5,814.00	3.13	6.37	0.463	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	10/10/2025	5,637.00	3.09	6.02	0.455	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	11/10/2025	5,798.00	3.00	6.23	0.452	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	12/10/2025	6,045.00	3.04	6.01	0.460	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	13/10/2025	6,022.00	3.02	6.54	0.464	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	14/10/2025	5,823.00	3.10	6.21	0.467	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	15/10/2025	5,821.00	3.01	6.39	0.450	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	16/10/2025	5,678.00	3.14	6.20	0.463	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	17/10/2025	5,789.00	3.13	6.37	0.471	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	18/10/2025	6,041.00	3.13	6.06	0.451	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	19/10/2025	6,012.00	3.06	6.54	0.469	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	20/10/2025	5,989.00	3.08	6.17	0.451	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	21/10/2025	5,826.00	3.08	6.10	0.462	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	22/10/2025	5,806.00	3.08	6.41	0.463	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	23/10/2025	5,548.00	3.13	6.30	0.469	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	24/10/2025	5,876.00	3.15	6.05	0.463	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	25/10/2025	5,669.00	3.15	6.43	0.459	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	26/10/2025	5,938.00	3.01	6.42	0.471	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	27/10/2025	5,898.00	3.05	6.22	0.464	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	28/10/2025	5,709.00	3.11	6.48	0.454	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	29/10/2025	5,637.00	3.02	6.22	0.459	0.57
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	30/10/2025	6,047.00	3.12	6.21	0.455	0.56
Segundo periodo	Mes 1	Octubre	31/10/2025	5,860.00	3.09	6.58	0.457	0.56
			Promedio	**5,819.94**	**3.08**	**6.30**	**0.460**	**0.57**

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado de octubre del 2025.

Durante el mes 1 del segundo periodo (octubre), correspondiente a la etapa con optimización del diseño de voladura, se evidenció una mejora significativa en el desempeño operativo del proceso de carguío y acarreo en comparación con el primer periodo. La producción de carguío alcanzó un promedio de 5,819.94 T/H, mostrando valores elevados y consistentes dentro de un rango de 5,536.00 T/H a 6,047.00 T/H, lo que reflejó una operación más eficiente y estable. Este incremento en la productividad estuvo directamente asociado a la mejora en la fragmentación del macizo rocoso, la cual favoreció el desempeño de los equipos de carguío. Asimismo, el tiempo de carguío presentó un promedio de 3.08 minutos, con valores mínimos de hasta 3.00 minutos, evidenciando una reducción significativa respecto al primer periodo y confirmando una mejora en la excavabilidad del material.

En cuanto a la fragmentación, el P80 registró un promedio de 6.30 pulgadas, manteniéndose dentro de un rango reducido (6.01 a 6.59 pulgadas), lo cual evidenció una fragmentación más fina y uniforme del macizo rocoso. Esta mejora fue resultado del incremento del factor de potencia, el cual alcanzó un promedio de 0.460 kg/m³, reflejando una mayor energía específica aplicada durante la voladura. Como consecuencia, se redujo la presencia de material sobredimensionado, facilitando el proceso de carguío y optimizando el ciclo operativo. Finalmente, el costo unitario promedio fue de 0.57 USD/T, mostrando una reducción significativa respecto al primer periodo, lo que evidenció una mejora en la eficiencia económica del proceso. En conjunto, los resultados del mes 1 del segundo periodo confirmaron que la optimización de la fragmentación tuvo un impacto directo y positivo en la productividad, eficiencia operativa y costos del sistema de carguío y acarreo.

Tabla 19

Parámetros de noviembre 2025

Periodo	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	1/11/2025	5,836.00	3.10	6.06	0.470	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	2/11/2025	5,687.00	3.04	6.53	0.458	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	3/11/2025	5,830.00	3.14	6.48	0.450	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	4/11/2025	5,799.00	3.03	6.21	0.455	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	5/11/2025	5,821.00	3.03	6.37	0.455	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	6/11/2025	5,728.00	3.00	6.55	0.464	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	7/11/2025	5,978.00	3.02	6.05	0.469	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	8/11/2025	5,712.00	3.14	6.32	0.460	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	9/11/2025	5,831.00	3.09	6.42	0.455	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	10/11/2025	6,049.00	3.04	6.11	0.462	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	11/11/2025	5,947.00	3.11	6.36	0.451	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	12/11/2025	5,678.00	3.05	6.06	0.450	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	13/11/2025	5,890.00	3.04	6.18	0.460	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	14/11/2025	5,849.00	3.14	6.35	0.463	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	15/11/2025	5,537.00	3.01	6.07	0.458	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	16/11/2025	5,722.00	3.01	6.39	0.450	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	17/11/2025	5,803.00	3.07	6.39	0.470	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	18/11/2025	6,025.00	3.15	6.48	0.464	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	19/11/2025	5,508.00	3.03	6.19	0.472	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	20/11/2025	5,665.00	3.06	6.48	0.471	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	21/11/2025	5,914.00	3.12	6.17	0.467	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	22/11/2025	5,667.00	3.12	6.52	0.468	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	23/11/2025	5,831.00	3.02	6.59	0.470	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	24/11/2025	5,639.00	3.14	6.47	0.464	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	25/11/2025	5,992.00	3.00	6.38	0.463	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	26/11/2025	5,822.00	3.15	6.09	0.466	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	27/11/2025	5,969.00	3.01	6.56	0.468	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	28/11/2025	5,942.00	3.07	6.29	0.457	0.57
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	29/11/2025	5,981.00	3.11	6.47	0.462	0.56
Segundo periodo	Mes 2	Noviembre	30/11/2025	5,557.00	3.00	6.58	0.455	0.56
			Promedio	**5,806.97**	**3.07**	**6.34**	**0.462**	**0.57**

Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado de noviembre del 2025.

Durante el mes 2 del segundo periodo (noviembre), se mantuvo el comportamiento eficiente del sistema evidenciado en octubre, consolidando los resultados de la optimización del diseño de voladura. La producción de carguío alcanzó un promedio de 5,806.97 T/H, manteniéndose dentro de un rango estable entre 5,508.00 T/H y 6,049.00 T/H, lo cual reflejó continuidad operativa y control en el proceso. Esta estabilidad evidenció que la mejora implementada no solo incrementó la productividad, sino que también permitió mantener un desempeño consistente en el tiempo. Asimismo, el tiempo de carguío presentó un promedio de 3.07 minutos, con valores mínimos de hasta 3.00 minutos, confirmando una reducción sostenida respecto al primer periodo y una mejora en la excavabilidad del material.

En relación con la fragmentación, el P80 registró un promedio de 6.34 pulgadas, manteniéndose dentro de un rango controlado (6.05 a 6.59 pulgadas), lo cual evidenció una fragmentación fina y uniforme del macizo rocoso. Este resultado fue consecuencia directa del incremento del factor de potencia, el cual alcanzó un promedio de 0.462 kg/m^3, superior al registrado en el primer periodo. Como efecto de esta mejora, se redujo la presencia de material sobredimensionado, optimizando el rendimiento de los equipos de carguío. Finalmente, el costo unitario se mantuvo en un promedio de 0.57 USD/T, evidenciando estabilidad en la eficiencia económica del proceso. En conjunto, los resultados del mes 2 confirmaron que la optimización aplicada permitió sostener altos niveles de productividad, eficiencia operativa y control de costos en el sistema de carguío y acarreo.

Tabla 20

Parámetros de diciembre 2025

Periodo	Mes	Mes	Fecha	T/H	Tiempo	P80	KG/T	USD/T
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	1/12/2025	5,900.00	3.09	6.15	0.452	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	2/12/2025	5,895.00	3.00	6.44	0.453	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	3/12/2025	5,774.00	3.03	6.59	0.467	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	4/12/2025	5,815.00	3.08	6.13	0.450	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	5/12/2025	5,634.00	3.02	6.03	0.454	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	6/12/2025	5,886.00	3.09	6.45	0.469	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	7/12/2025	5,644.00	3.14	6.13	0.469	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	8/12/2025	5,568.00	3.00	6.50	0.460	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	9/12/2025	5,507.00	3.09	6.11	0.471	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	10/12/2025	5,851.00	3.08	6.41	0.468	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	11/12/2025	6,043.00	3.13	6.01	0.469	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	12/12/2025	5,618.00	3.04	6.48	0.454	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	13/12/2025	5,540.00	3.03	6.07	0.466	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	14/12/2025	5,527.00	3.01	6.16	0.450	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	15/12/2025	5,966.00	3.15	6.47	0.464	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	16/12/2025	5,821.00	3.01	6.27	0.451	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	17/12/2025	5,838.00	3.14	6.23	0.454	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	18/12/2025	6,046.00	3.14	6.32	0.450	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	19/12/2025	5,805.00	3.06	6.37	0.461	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	20/12/2025	5,823.00	3.06	6.47	0.458	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	21/12/2025	5,532.00	3.10	6.43	0.453	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	22/12/2025	5,673.00	3.11	6.34	0.469	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	23/12/2025	5,898.00	3.07	6.25	0.454	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	24/12/2025	5,703.00	3.10	6.09	0.453	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	25/12/2025	5,904.00	3.02	6.11	0.460	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	26/12/2025	5,534.00	3.04	6.25	0.459	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	27/12/2025	5,602.00	3.05	6.27	0.465	0.57
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	28/12/2025	5,512.00	3.00	6.40	0.466	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	29/12/2025	5,744.00	3.15	6.00	0.456	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	30/12/2025	5,885.00	3.05	6.00	0.454	0.56
Segundo periodo	Mes 3	Diciembre	31/12/2025	5,914.00	3.11	6.17	0.460	0.57
			Promedio	**5,754.90**	**3.07**	**6.26**	**0.459**	**0.56**

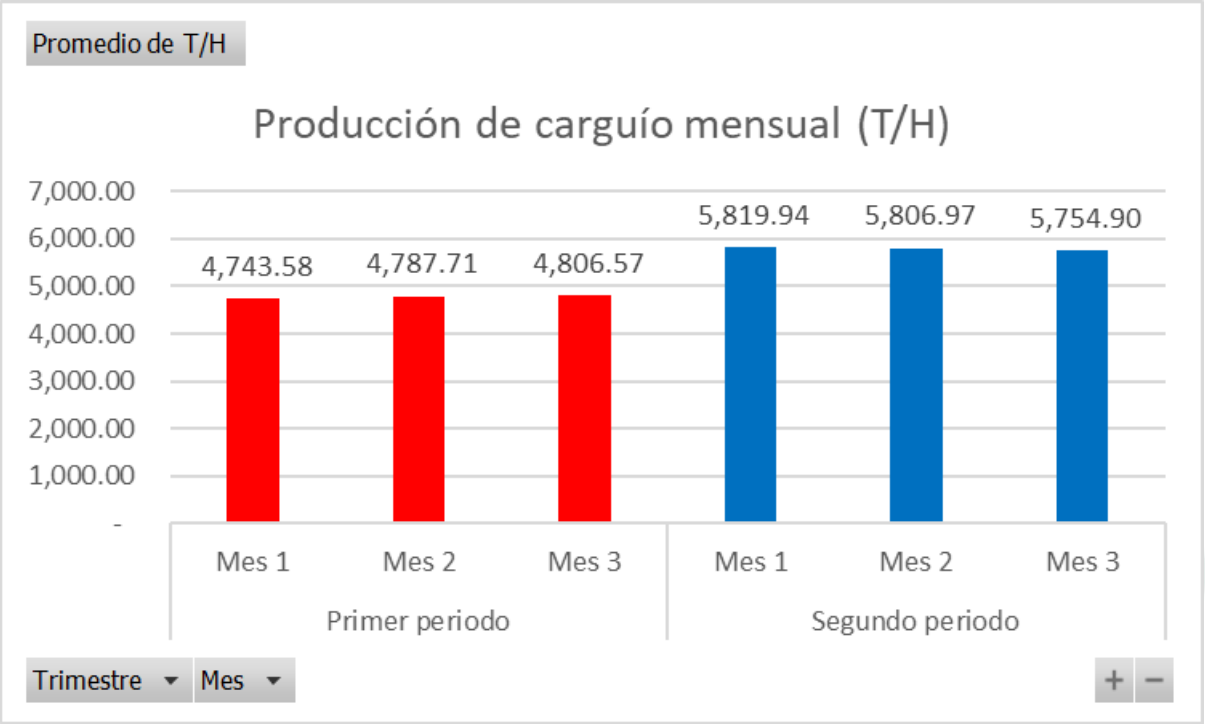
Nota. Resultados de producción, tiempo, fragmentación, factor de potencia y costo de minado de diciembre del 2025.

Durante el mes 3 del segundo periodo (diciembre), se mantuvo el desempeño eficiente alcanzado en los meses anteriores, consolidando los efectos de la optimización del diseño de voladura sobre el proceso de carguío y acarreo. La producción de carguío registró un promedio de 5,754.90 T/H, con valores que oscilaron entre 5,507.00 T/H y 6,046.00 T/H, evidenciando una operación estable y con ligeras variaciones propias de las condiciones diarias de trabajo. Si bien se observó una leve disminución respecto a octubre y noviembre, los valores se mantuvieron significativamente superiores a los del primer periodo. En cuanto al tiempo de carguío, se obtuvo un promedio de 3.07 minutos, manteniéndose constante y cercano a los valores mínimos del ciclo operativo, lo cual confirmó la mejora sostenida en la excavabilidad del material fragmentado.

En relación con la fragmentación, el P80 alcanzó un promedio de 6.26 pulgadas, con un rango de variación entre 6.00 y 6.59 pulgadas, lo que evidenció una fragmentación fina, uniforme y controlada del macizo rocoso. Este comportamiento fue resultado de la aplicación de un mayor factor de potencia, el cual presentó un promedio de 0.459 kg/m³, manteniéndose en niveles óptimos para garantizar una adecuada liberación de energía en la voladura. Como consecuencia, se logró minimizar la presencia de material sobredimensionado y mejorar la eficiencia del carguío. Finalmente, el costo unitario se redujo ligeramente a 0.56 USD/T, representando el valor más bajo del periodo evaluado, lo cual evidenció una optimización económica del proceso. En conjunto, los resultados del mes 3 confirmaron la sostenibilidad de la mejora implementada, logrando altos niveles de productividad, eficiencia operativa y reducción de costos en el sistema de carguío y acarreo.

Figura 1.

Producción mensual

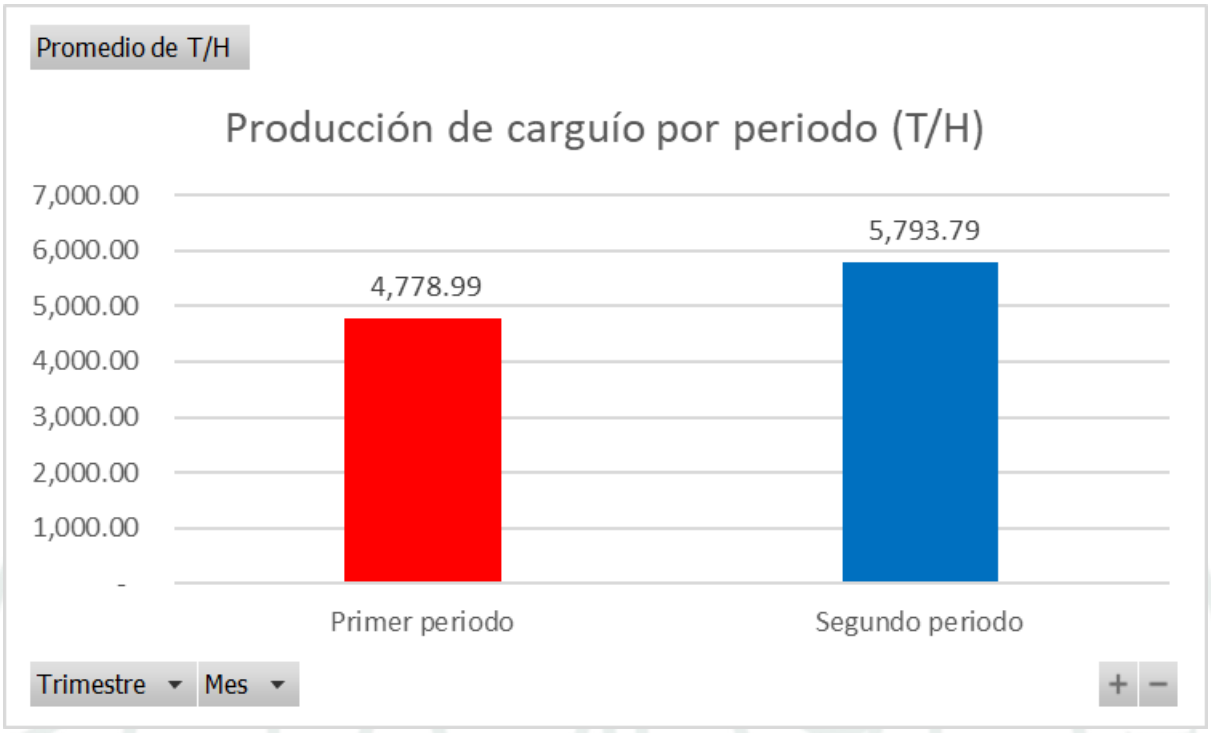


Nota. Resultados de producción mensual del primer y segundo periodo del 2025.

El análisis de la producción de carguío mensual (T/H) evidenció una mejora significativa entre el primer y segundo periodo de evaluación. En el primer periodo, los valores se mantuvieron relativamente estables, con promedios de 4,743.58 T/H, 4,787.71 T/H y 4,806.57 T/H, reflejando una operación con limitada eficiencia y sin variaciones relevantes. En contraste, durante el segundo periodo se observó un incremento notable en la producción, alcanzando valores de 5,819.94 T/H, 5,806.97 T/H y 5,754.90 T/H, lo que representó una mejora sostenida en el desempeño del sistema. Este incremento estuvo directamente asociado a la optimización de la fragmentación del macizo rocoso, la cual permitió mejorar la excavabilidad del material, reducir los tiempos de carguío y aumentar la eficiencia operativa de los equipos, consolidando así una mayor productividad en el proceso de carguío y acarreo.

Figura 2.

Producción por periodo

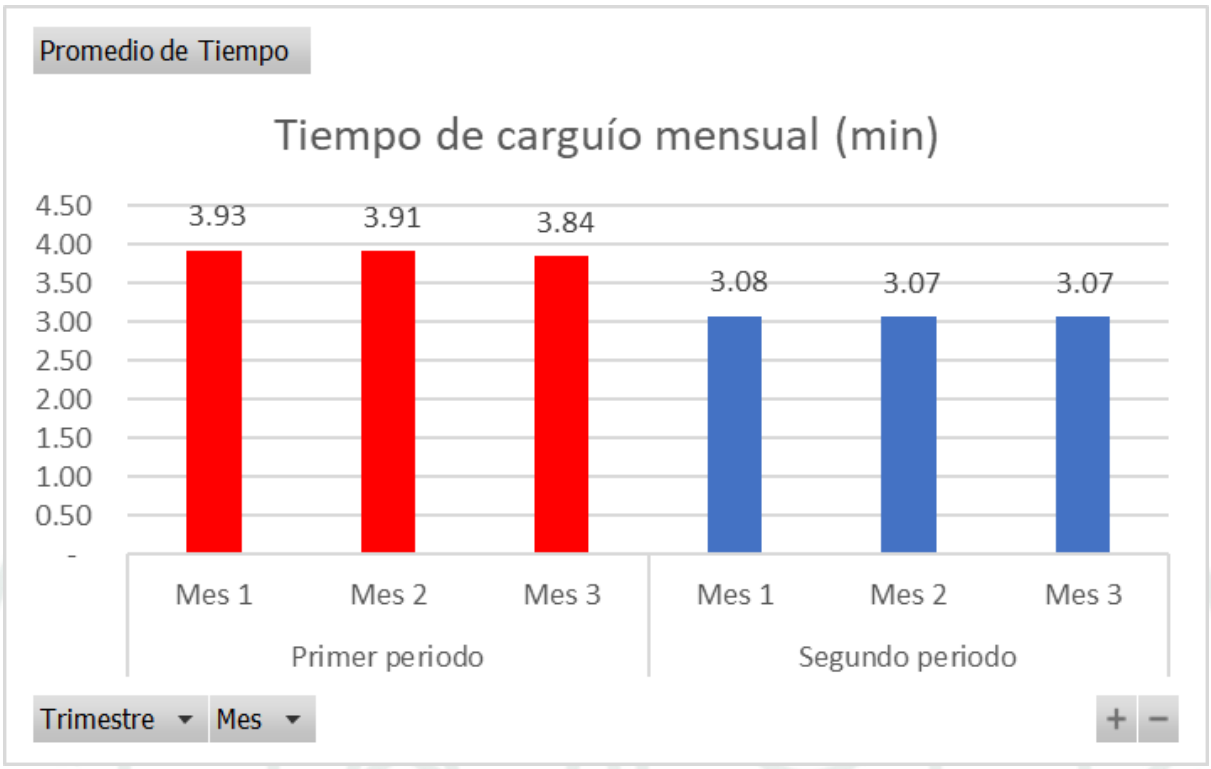


Nota. Resultados de producción por periodo del 2025.

El análisis de la producción de carguío por periodo (T/H) evidenció una mejora significativa tras la implementación de la optimización de la fragmentación del macizo rocoso. En el primer periodo, la producción promedio fue de 4,778.99 T/H, reflejando un desempeño operativo limitado debido a una fragmentación gruesa que afectaba la eficiencia del carguío. En contraste, en el segundo periodo la producción se incrementó a 5,793.79 T/H, lo que representa una mejora considerable en el rendimiento del sistema. Este incremento estuvo directamente asociado a la reducción del tamaño de fragmentación (P80), lo cual permitió mejorar la excavabilidad del material, reducir los tiempos de carguío y optimizar el desempeño de los equipos. En conjunto, estos resultados confirmaron que la optimización de la voladura tuvo un impacto positivo y directo en la productividad del proceso de carguío y acarreo.

Figura 3.

Tiempo de carguío mensual

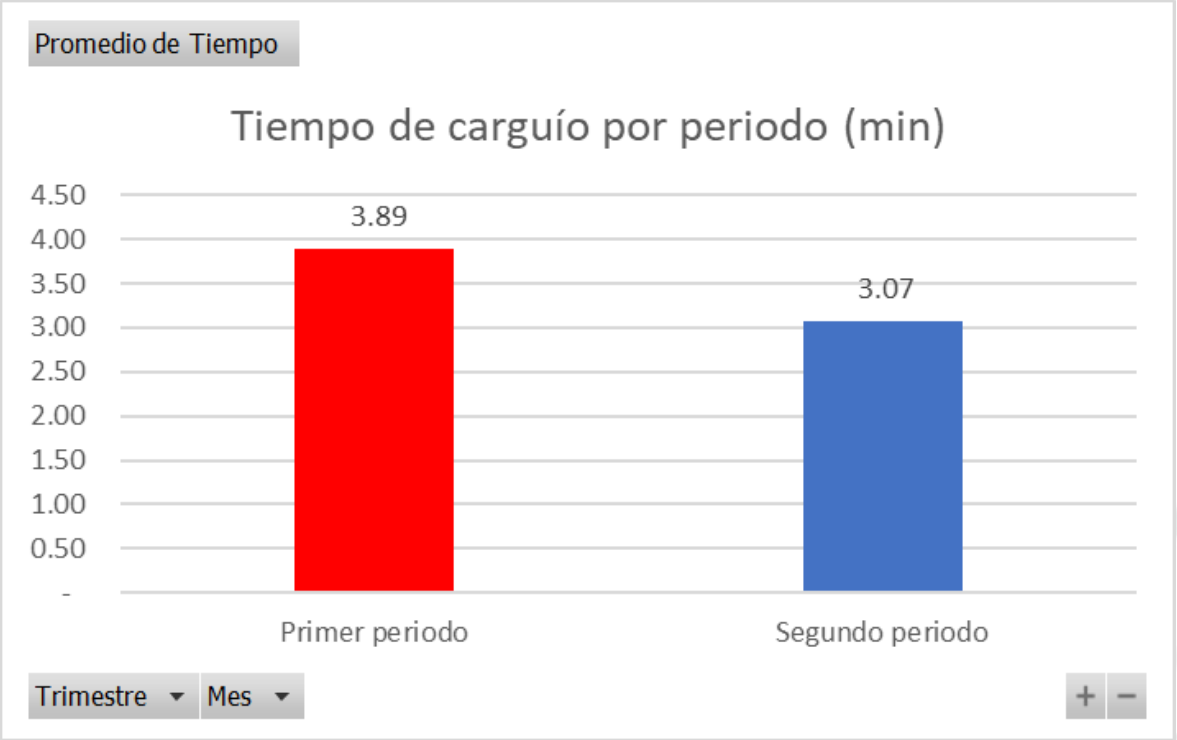


Nota. Resultados del tiempo de carguío mensual del primer y segundo periodo del 2025.

El análisis del tiempo de carguío mensual evidenció una reducción significativa entre el primer y segundo periodo de evaluación. En el primer periodo, los tiempos promedio fueron de 3.93, 3.91 y 3.84 minutos, mostrando una ligera disminución progresiva, pero aún en niveles elevados debido a la fragmentación gruesa del material. En contraste, durante el segundo periodo los tiempos se redujeron a 3.08, 3.07 y 3.07 minutos, manteniéndose estables y cercanos a los valores mínimos del ciclo operativo. Esta disminución estuvo directamente relacionada con la mejora en la fragmentación del macizo rocoso, la cual facilitó la excavabilidad del material, redujo la resistencia al carguío y permitió optimizar el rendimiento de los equipos. En conjunto, estos resultados confirmaron que la optimización de la voladura contribuyó significativamente a mejorar la eficiencia del proceso de carguío, reduciendo los tiempos operativos de manera sostenida.

Figura 4.

Tiempo de carguío de pala por periodo

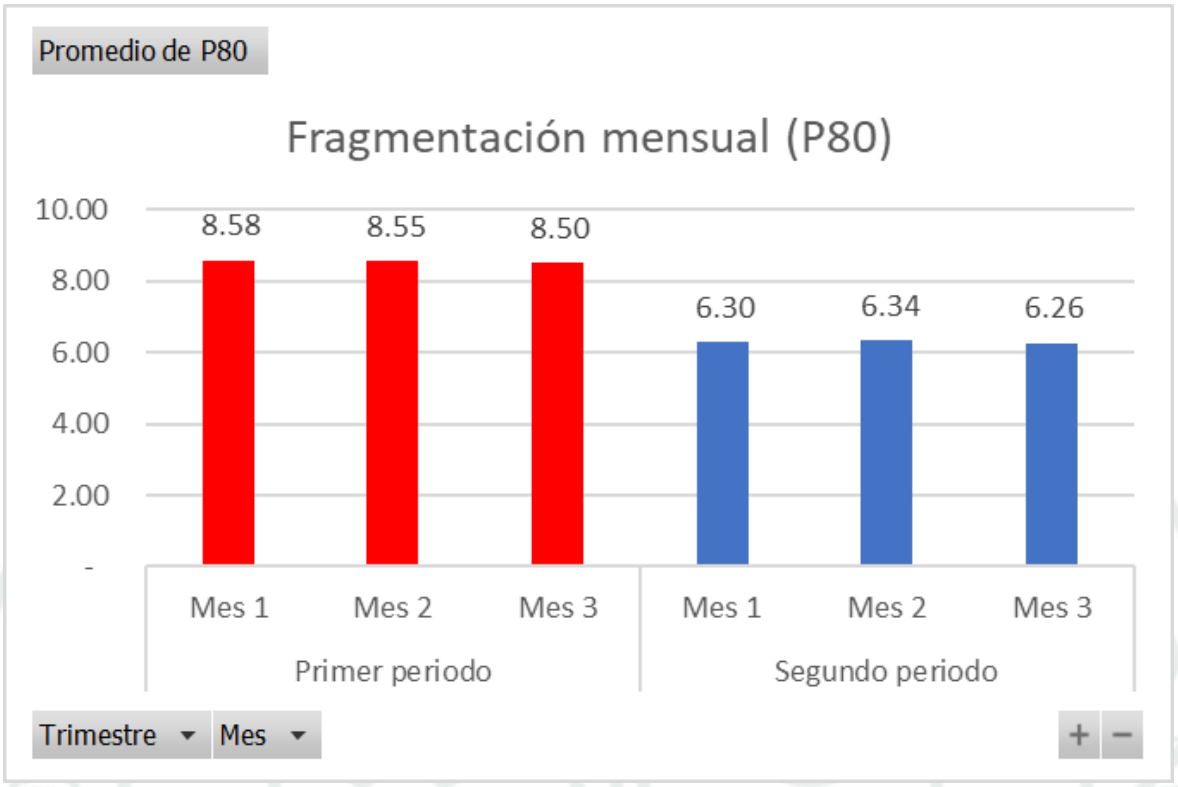


Nota. Resultados del tiempo de carguío por periodo del 2025.

El análisis del tiempo de carguío por periodo evidenció una mejora significativa en la eficiencia operativa tras la implementación de la optimización de la fragmentación del macizo rocoso. En el primer periodo, el tiempo promedio de carguío fue de 3.89 minutos, reflejando una operación con mayores dificultades en la excavabilidad del material debido a una fragmentación gruesa. En contraste, en el segundo periodo el tiempo se redujo a 3.07 minutos, lo que representa una disminución considerable en la duración del ciclo de carguío. Esta reducción estuvo directamente relacionada con la mejora en la calidad de la fragmentación, la cual permitió facilitar la penetración del cucharón, disminuir la resistencia del material y optimizar el rendimiento de los equipos. En conjunto, estos resultados confirmaron que la optimización de la voladura contribuyó de manera directa a reducir los tiempos operativos y mejorar la productividad del sistema de carguío y acarreo.

Figura 5.

Fragmentación mensual



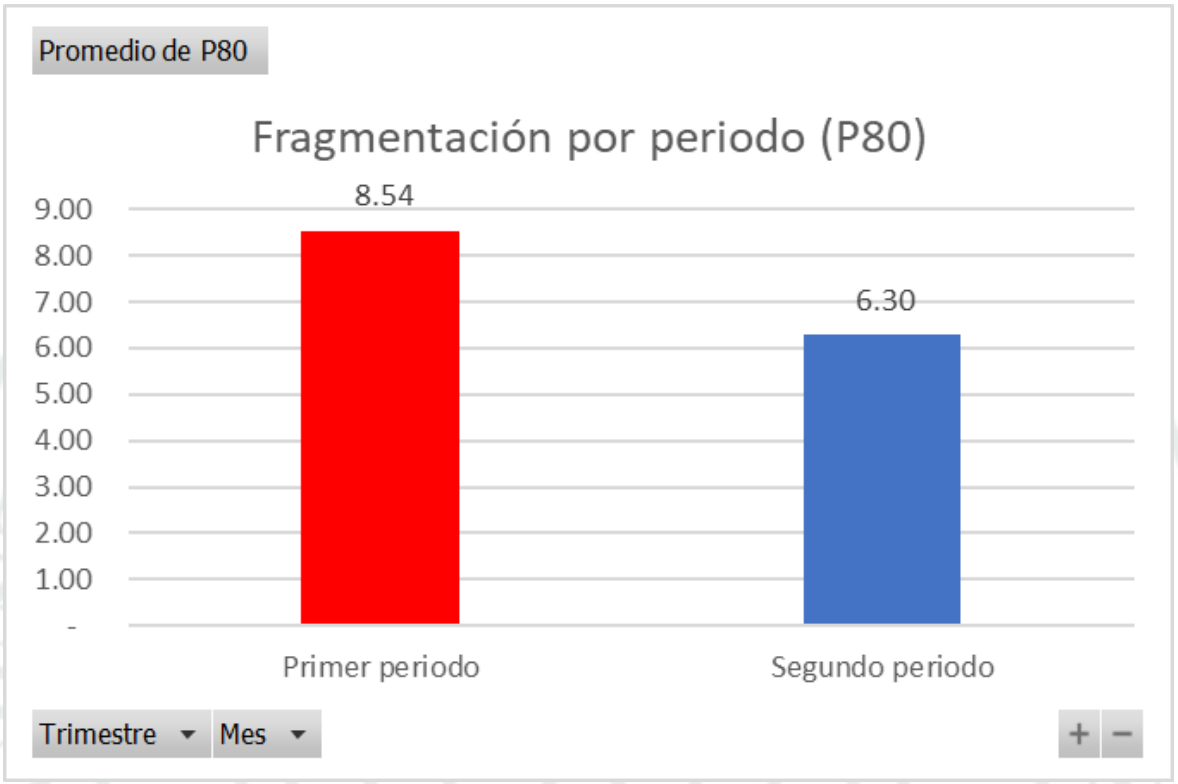
Nota. Fragmentación del primer y segundo periodo del 2025.

El análisis de la fragmentación mensual (P80) evidenció una mejora significativa en la calidad del material volado tras la implementación de la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, los valores de P80 se mantuvieron elevados, con promedios de 8.58, 8.55 y 8.50 pulgadas, lo que reflejó una fragmentación gruesa del macizo rocoso y la presencia de material sobredimensionado que dificultaba el proceso de carguío. En contraste, en el segundo periodo los valores se redujeron considerablemente a 6.30, 6.34 y 6.26 pulgadas, evidenciando una fragmentación más fina y uniforme. Esta reducción del tamaño de fragmentación permitió mejorar la excavabilidad del material, disminuir la resistencia durante el carguío y optimizar el rendimiento de los equipos. En conjunto, los resultados confirmaron que la optimización de los parámetros de voladura tuvo un impacto directo en la

mejora de la fragmentación, contribuyendo al incremento de la productividad del sistema de carguío y acarreo.

Figura 6.

Fragmentación por periodo



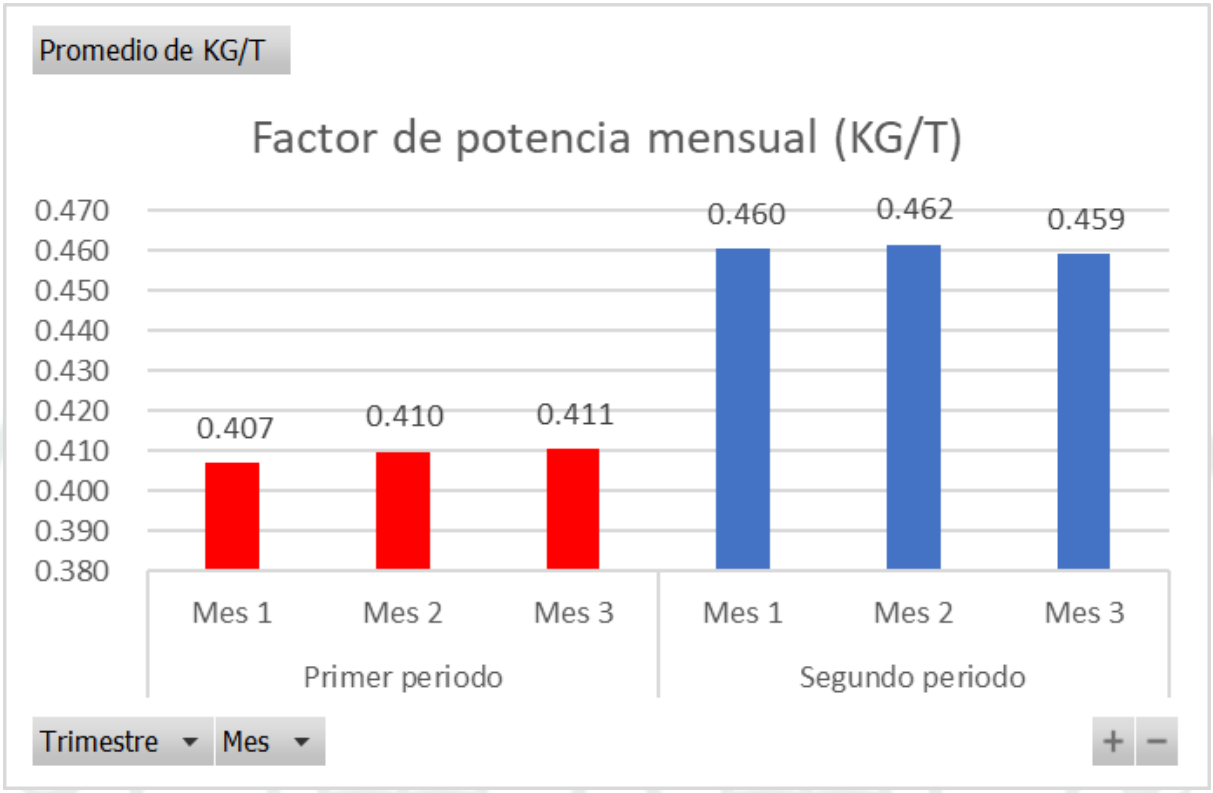
Nota. Resultados de fragmentación por periodo del 2025.

El análisis de la fragmentación por periodo (P80) evidenció una mejora significativa en la calidad del material volado tras la implementación de la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, el P80 promedio fue de 8.54 pulgadas, reflejando una fragmentación gruesa del macizo rocoso, lo cual generaba presencia de material sobredimensionado y afectaba la eficiencia del proceso de carguío. En contraste, en el segundo periodo el P80 se redujo a 6.30 pulgadas, lo que representa una mejora considerable en la fragmentación. Esta disminución del tamaño de partícula permitió obtener un material más fino y uniforme, facilitando la excavabilidad, reduciendo los tiempos de carguío y mejorando el rendimiento de los equipos. En conjunto, estos resultados confirmaron que la

optimización de los parámetros de voladura tuvo un impacto directo en la mejora de la fragmentación y, por consiguiente, en la productividad del sistema de carguío y acarreo.

Figura 7.

Factor de potencia mensual



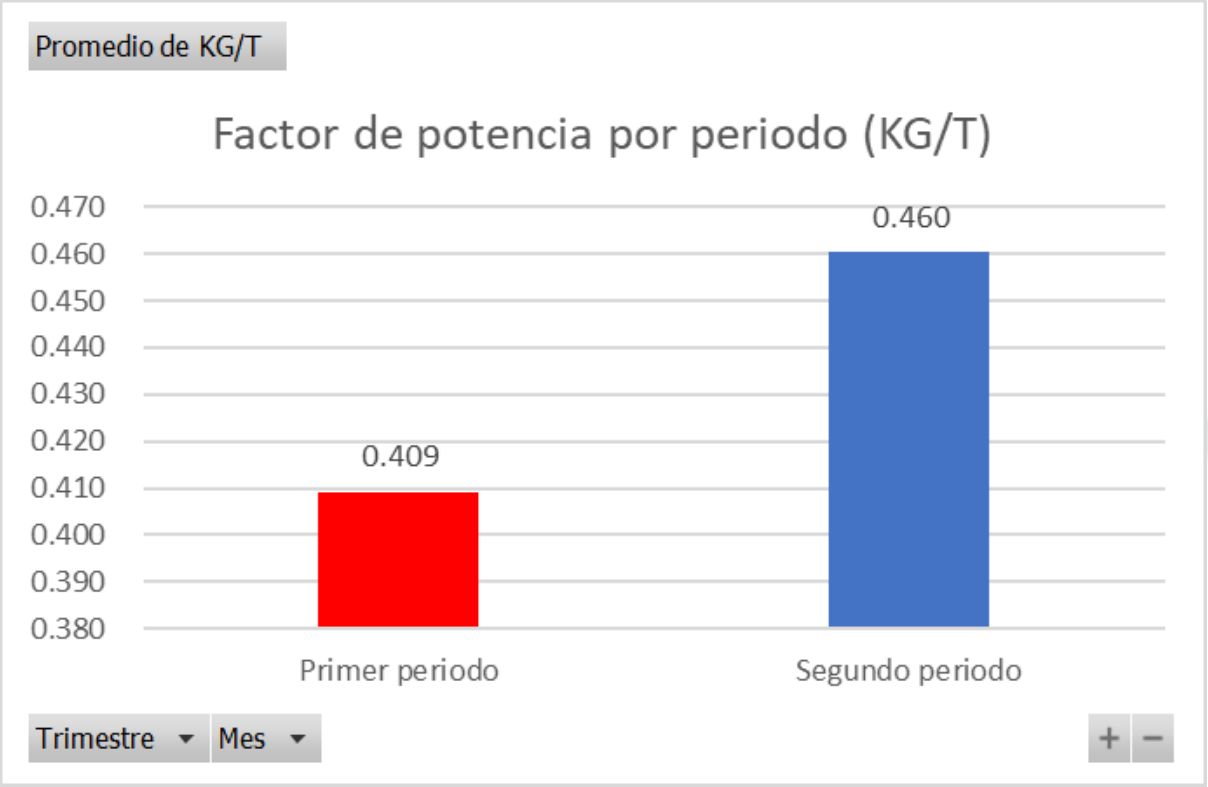
Nota. Resultados del factor de potencia del primer y segundo periodo del 2025.

El análisis del factor de potencia mensual (kg/t) evidenció un incremento controlado tras la implementación de la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, los valores se mantuvieron bajos y relativamente constantes, con promedios de 0.407, 0.410 y 0.411 kg/t, lo que reflejó una limitada energía específica aplicada al macizo rocoso, insuficiente para lograr una fragmentación eficiente. En contraste, durante el segundo periodo se observó un aumento del factor de potencia a 0.460, 0.462 y 0.459 kg/t, lo cual evidenció una mayor cantidad de energía por tonelada de roca volada. Este incremento fue determinante para mejorar la fragmentación del material, reduciendo el tamaño de partícula (P80) y favoreciendo la excavabilidad. En conjunto, los resultados confirmaron que el ajuste del

factor de potencia fue un elemento clave en la optimización del proceso, contribuyendo directamente a la mejora de la productividad y eficiencia del sistema de carguío y acarreo.

Figura 8.

Factor de potencia por periodo



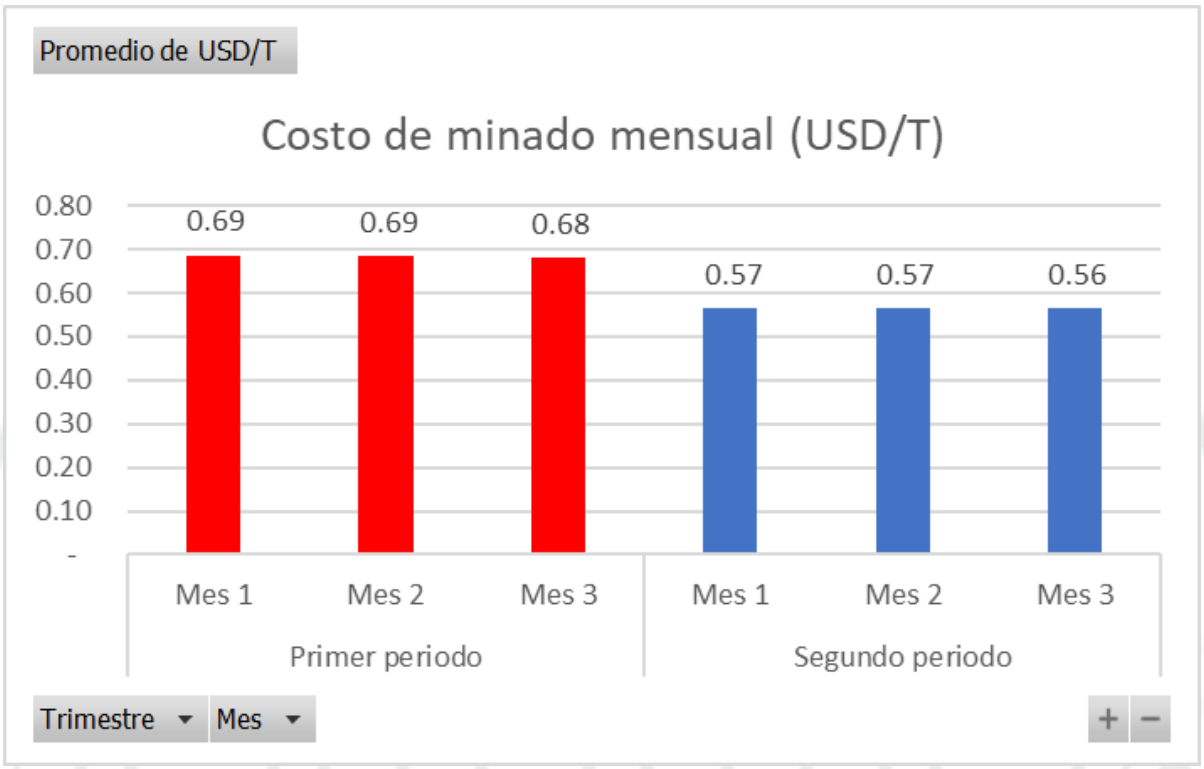
Nota. Resultados del factor de potencia por periodo del 2025.

El análisis del factor de potencia por periodo evidenció un incremento significativo tras la implementación de la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, el factor de potencia promedio fue de 0.409 kg/t, lo que reflejó una baja energía específica aplicada al macizo rocoso, limitando la eficiencia de la fragmentación. En contraste, en el segundo periodo este valor se incrementó a 0.460 kg/t, evidenciando un aumento en la cantidad de energía utilizada por tonelada de roca volada. Este incremento permitió mejorar la fragmentación del material, reduciendo el tamaño de partícula (P80) y favoreciendo la excavabilidad durante el proceso de carguío. En conjunto, los resultados confirmaron que el

aumento controlado del factor de potencia fue determinante para optimizar la fragmentación y, en consecuencia, mejorar la productividad y eficiencia del sistema de carguío y acarreo.

Figura 9.

Costo de minado mensual



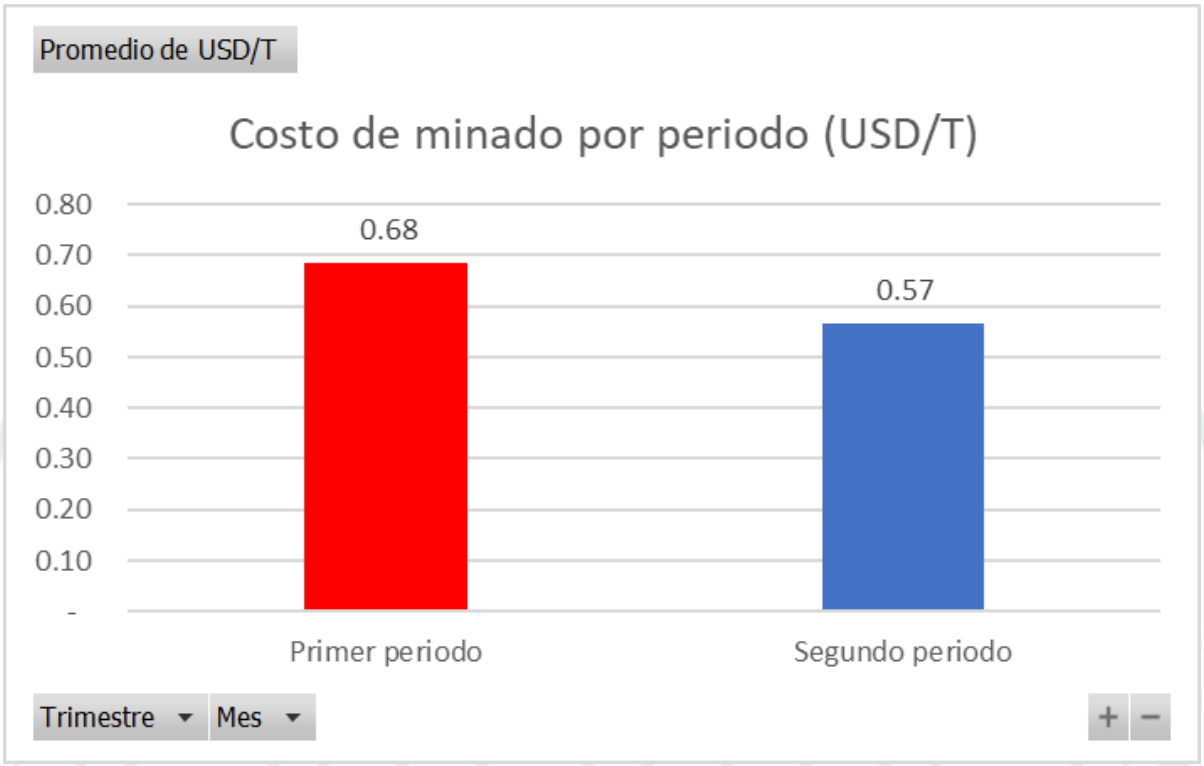
Nota. Resultados del costo de minado del primer y segundo periodo del 2025.

El análisis del costo de minado mensual (USD/T) evidenció una reducción progresiva tras la implementación de la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, los costos se mantuvieron en valores relativamente elevados y constantes, con promedios de 0.69, 0.69 y 0.68 USD/T, lo que reflejó una operación con limitada eficiencia económica, influenciada por una fragmentación deficiente y mayores tiempos de carguío. En contraste, durante el segundo periodo los costos disminuyeron a 0.57, 0.57 y 0.56 USD/T, evidenciando una mejora significativa en la eficiencia del proceso. Esta reducción estuvo directamente asociada a la mejora en la fragmentación del macizo rocoso, la cual permitió optimizar los tiempos de carguío, incrementar la productividad y reducir el consumo operativo. En

conjunto, los resultados confirmaron que la optimización de la voladura contribuyó de manera directa a la disminución de los costos unitarios del proceso de carguío y acarreo.

Figura 10.

Costo de minado por periodo



Nota. Resultados del costo de minado por periodo del 2025.

El análisis del costo de minado por periodo (USD/T) evidenció una reducción significativa tras la implementación de la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, el costo promedio fue de 0.68 USD/T, reflejando una operación con menor eficiencia debido a la fragmentación gruesa y mayores tiempos de carguío. En contraste, en el segundo periodo el costo se redujo a 0.57 USD/T, lo que representa una mejora importante en la eficiencia económica del proceso. Esta disminución estuvo directamente asociada a la mejora en la fragmentación del macizo rocoso, la cual permitió incrementar la productividad, reducir los tiempos operativos y optimizar el uso de los recursos. En conjunto, los resultados confirmaron que la optimización de los parámetros de voladura tuvo un impacto directo en la reducción de los costos unitarios del proceso de carguío y acarreo.

4.9 Aplicación y resultados del software Split Online

4.9.1 Aplicación del software split online

Para la validación de la fragmentación del macizo rocoso se empleó el software Split Online, herramienta especializada en el análisis digital de imágenes para la determinación de la distribución granulométrica del material volado. La aplicación del software se realizó durante los dos periodos de evaluación del año 2025, comprendiendo el primer periodo sin mejora y el segundo periodo con la implementación de la optimización del diseño de voladura mediante el modelo Kuz-Ram.

El procedimiento consistió en la captura sistemática de imágenes del material fragmentado en el frente de carguío, asegurando condiciones adecuadas de iluminación, escala y enfoque para garantizar la precisión del análisis. Posteriormente, las imágenes fueron procesadas en el software Split Online, el cual permitió identificar los fragmentos, generar curvas granulométricas y determinar el tamaño característico P80 para cada voladura.

Asimismo, se establecieron criterios de control para la toma de datos, tales como la ubicación del punto de captura, el uso de elementos de escala y la repetición de mediciones, con la finalidad de reducir errores y obtener resultados representativos. Este procedimiento permitió contar con información confiable para evaluar la calidad de la fragmentación en ambos periodos de estudio.

4.9.2 Resultados obtenidos con split online

Los resultados obtenidos mediante el software Split Online evidenciaron una mejora significativa en la fragmentación del macizo rocoso tras la implementación de la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, el tamaño de fragmentación P80 presentó un promedio de 8.54 pulgadas, lo cual indicó una fragmentación gruesa y

la presencia de material sobredimensionado que afectaba el desempeño del proceso de carguío.

En contraste, en el segundo periodo, el P80 promedio se redujo a 6.30 pulgadas, evidenciando una fragmentación más fina y uniforme del material volado. Esta reducción representó una mejora aproximada del 26.26%, lo cual confirmó la efectividad de la optimización aplicada.

A nivel mensual, los resultados mostraron consistencia en la mejora de la fragmentación, con valores de P80 en el segundo periodo dentro de rangos controlados, lo que permitió reducir la variabilidad del material fragmentado. Esta condición favoreció directamente la excavabilidad, disminuyó la presencia de bloques sobredimensionados y optimizó el rendimiento de los equipos de carguío.

4.9.3 Validación del modelo Kuz-Ram con split online

La comparación entre los resultados estimados mediante el modelo Kuz-Ram y los valores obtenidos con Split Online evidenció una alta concordancia entre ambos métodos. El modelo Kuz-Ram estimó un P80 de 6.43 pulgadas en el segundo periodo, mientras que el valor medido con Split Online fue de 6.30 pulgadas, lo que representó una diferencia mínima del 2.02%.

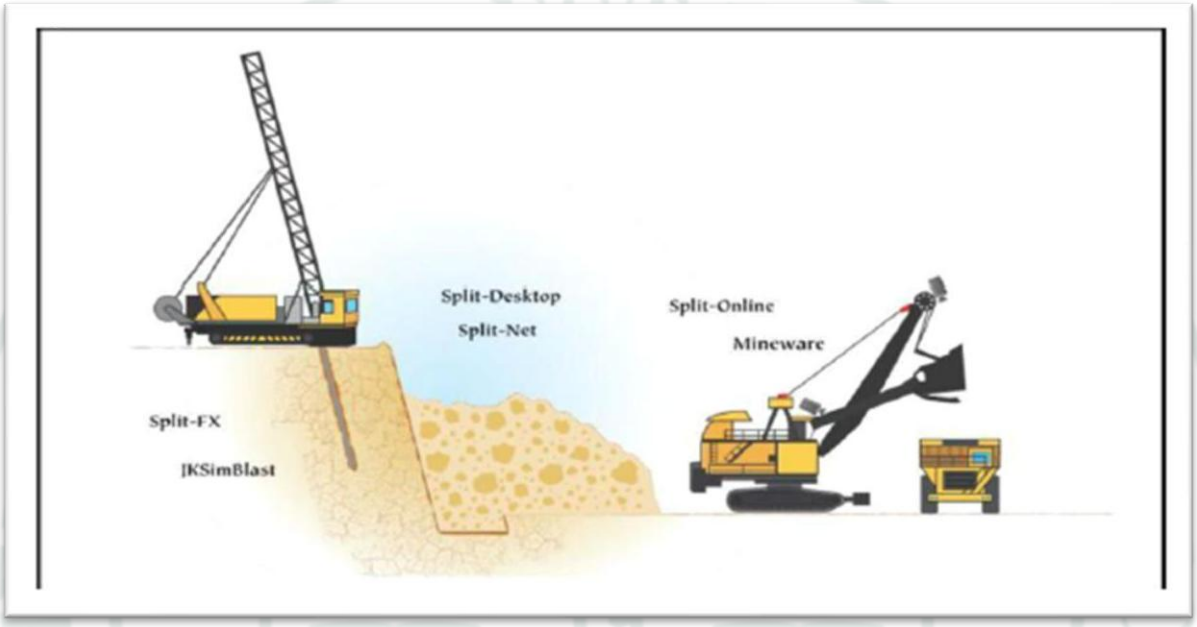
Esta proximidad entre los resultados teóricos y reales permitió validar la confiabilidad del modelo Kuz-Ram como herramienta de predicción de la fragmentación en la operación minera. Asimismo, la validación mediante Split Online confirmó que la optimización de los parámetros de voladura generó resultados efectivos en condiciones reales de campo.

En conjunto, la aplicación del software Split Online permitió no solo medir la fragmentación con alta precisión, sino también verificar el impacto de la optimización

implementada, demostrando que la mejora en la fragmentación del macizo rocoso tuvo un efecto directo en la eficiencia del proceso de carguío y acarreo.

Figura 11.

Posición de equipos del Split online



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 12.

Equipo split online



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 13.

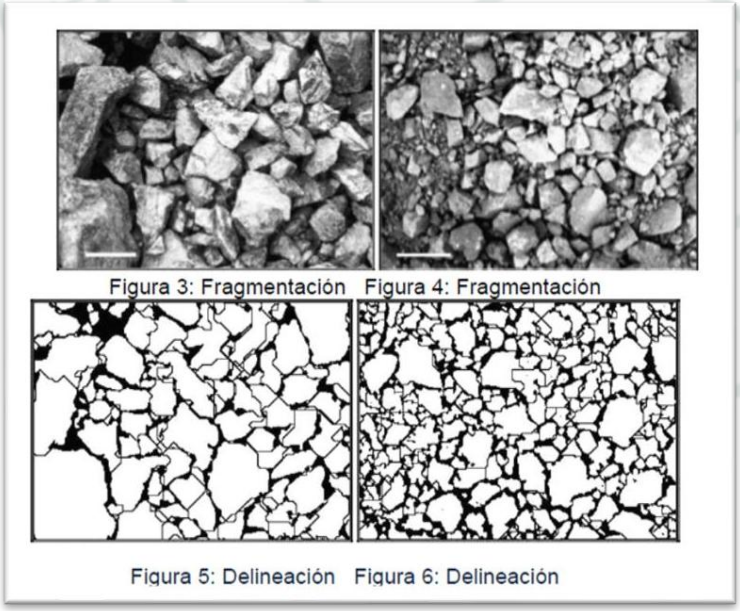
Frente de minado



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 14.

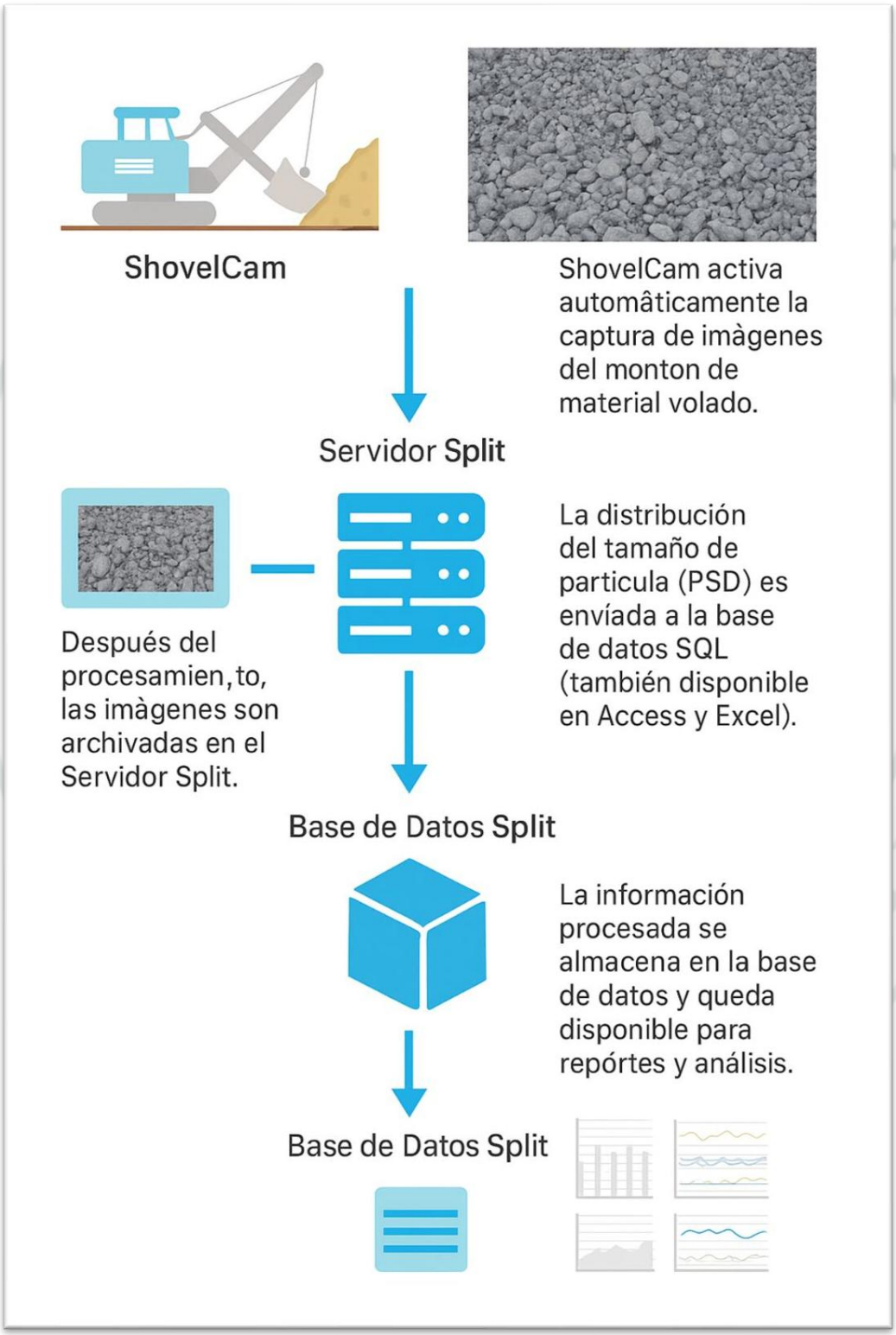
Escala de grises



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

Figura 15.

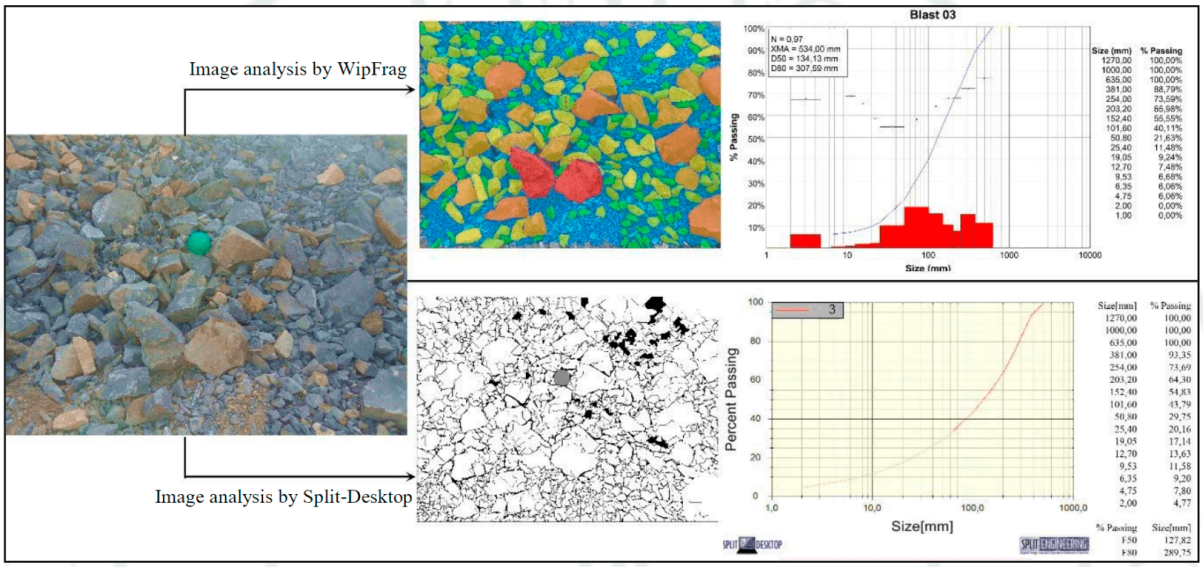
Proceso split online



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 16.

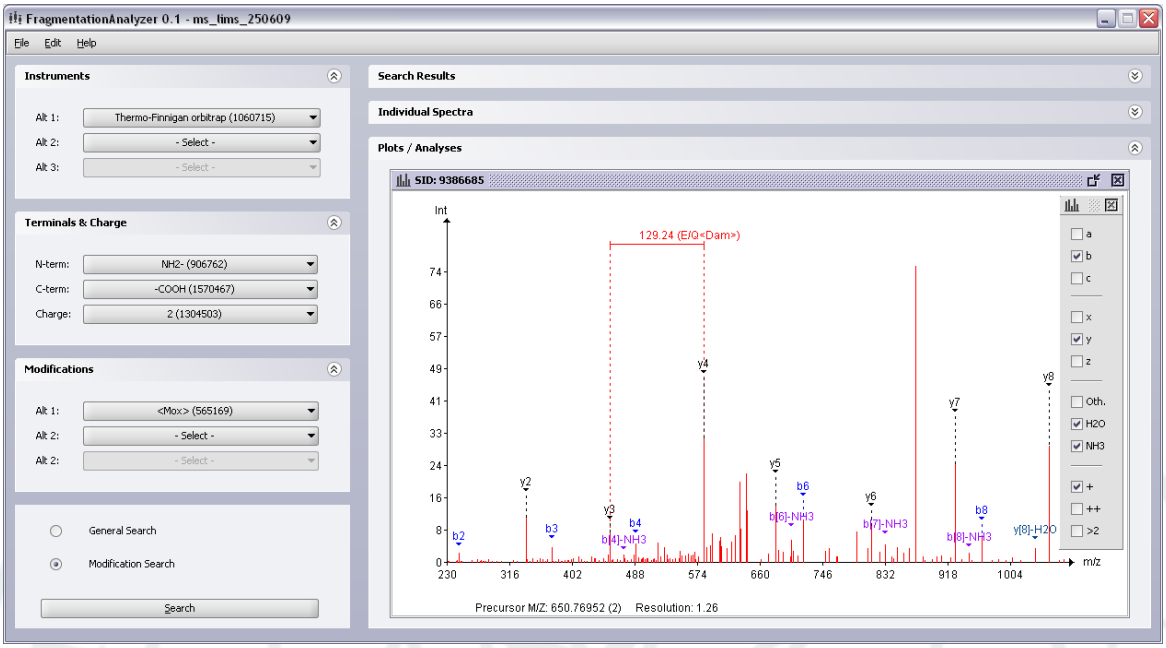
Diagrama split online



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 17.

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 21

Parámetros de explosivos y caracterización del macizo rocoso

Parámetro	Unidad	Primer periodo (sin mejora)	Segundo periodo (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	—	Heavy ANFO 37	Heavy ANFO 37	Alta energía y buena fragmentación
Sistema de iniciación	—	Booster	Booster optimizado	Mejor transmisión de energía
Burden (B)	m	8.6	7.5	Mayor energía específica
Espaciamiento (E)	m	9.6	8.5	Mejor distribución de energía
Subperforación (J)	m	1.5	1.5	Constante
Longitud de carga	m	11.5	13	Mayor energía aplicada
Densidad explosivo	kg/m³	850 – 900	850 – 900	Energía adecuada para roca dura
VOD (velocidad detonación)	m/s	3,500 – 4,000	4,000 – 4,500	Mayor eficiencia de rotura
Factor de potencia	kg/t	0.409	0.46	Incremento controlado
Factor de potencia	kg/m³	0.6	0.878	Mayor liberación de energía
Carga por taladro	kg	742.55	839.41	Mayor energía por taladro
Distribución de carga	—	Columna uniforme	Columna optimizada	Mejor fragmentación
Relación columna/taco	—	55% / 45%	60% / 40%	Mayor confinamiento
Tipo de detonador	—	Convencional	Optimizado	Mayor precisión
Precisión de retardo	ms	±10%	±5%	Mejor sincronización
Secuencia de disparo	—	Convencional	Optimizada	Mejor interacción de ondas
Ubicación del booster	—	Fondo	Fondo optimizado	Mejor iniciación
Control de desviación	—	Limitado	Controlado	Mayor precisión

Tipo de voladura	—	Convencional	Optimizada	Mejora global

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

l análisis de los parámetros presentados en la tabla evidenció que las condiciones geomecánicas del macizo rocoso se mantuvieron constantes en ambos periodos, caracterizándose por una roca tipo diorita, con valores de RQD entre 80 y 85%, RMR entre 60 y 65 y un GSI de 55 a 65, lo que corresponde a un macizo rocoso competente y moderadamente fracturado. Esta condición permitió establecer que las variaciones observadas en los resultados operativos no estuvieron influenciadas por cambios en la calidad del macizo, sino por la optimización de los parámetros de voladura. Asimismo, el uso del explosivo Heavy ANFO 37 se mantuvo constante en ambos periodos, garantizando que las mejoras obtenidas no se debieron a un cambio en el tipo de explosivo, sino a una mejor aplicación de la energía en el macizo rocoso.

Por otro lado, se observó que la optimización del diseño de voladura en el segundo periodo se centró en la reducción del burden y espaciamiento, así como en el incremento de la longitud de la columna explosiva, lo que permitió aumentar el factor de potencia de 0.409 a 0.460 kg/t y el factor de potencia de 0.600 a 0.878 kg/m³. Este incremento en la energía específica generó una mejor fragmentación del material, reduciendo el tamaño de partícula (P80) y favoreciendo la excavabilidad. Asimismo, la optimización de la distribución de carga, la relación columna/taco y la secuencia de disparo permitió mejorar la interacción de ondas de choque, logrando una fragmentación más uniforme. En conjunto, los cambios implementados evidenciaron que la correcta optimización de los parámetros de voladura es determinante para mejorar la eficiencia del proceso de carguío y acarreo, incrementando la productividad y reduciendo los costos operativos.

Tabla 22

Resultados generales del primer y segundo periodo

Indicador	Unidad	Primer periodo (sin mejora)	Segundo periodo (con mejora)	Variación (%)
Producción (T/H)	T/H	4,778.99	5,793.79	21.23%
Tiempo de carguío	min	3.89	3.07	-21.06%
Fragmentación (P80)	pulgadas	8.54	6.30	-26.26%
Factor de potencia	kg/t	0.41	0.46	12.51%
Costo de minado	USD/T	0.68	0.57	-17.39%

Nota. Elaboración propia.

4.10 Análisis

El análisis de los indicadores clave de desempeño (KPI) permitió evaluar de manera integral el impacto de la optimización del diseño de voladura sobre el proceso de carguío y acarreo. Para ello, se compararon los resultados obtenidos en el primer periodo (sin mejora) y el segundo periodo (con implementación), considerando los indicadores de producción (T/H), tiempo de carguío, fragmentación (P80), factor de potencia (kg/t) y costo unitario (USD/T)

4.10.1 Producción de carguío (T/H)

El análisis de la producción de carguío evidenció un incremento significativo tras la optimización del diseño de voladura. En el primer periodo, la producción promedio fue de 4,778.99 T/H, mientras que en el segundo periodo alcanzó 5,793.79 T/H, lo que representó un incremento del 21.23%.

Este aumento en la productividad estuvo directamente relacionado con la mejora en la fragmentación del macizo rocoso, la cual permitió una mayor eficiencia en el proceso de excavación, reduciendo el esfuerzo de los equipos y optimizando el llenado del cucharón. Asimismo, la reducción de material sobredimensionado contribuyó a mejorar la continuidad operativa.

4.10.2 Tiempo de carguío (min)

En cuanto al tiempo de carguío, se evidenció una reducción significativa en el segundo periodo. El tiempo promedio disminuyó de 3.89 minutos a 3.07 minutos, lo que representó una reducción del 21.06%.

Esta mejora estuvo asociada a una mejor fragmentación del material, la cual facilitó la excavabilidad y redujo la resistencia durante el carguío. Como resultado, se logró optimizar el ciclo operativo y aumentar la eficiencia del sistema.

4.10.3 Fragmentación del macizo rocoso (P80)

El análisis de la fragmentación mostró una mejora significativa en la calidad del material volado. En el primer periodo, el P80 promedio fue de 8.54 pulgadas, mientras que en el segundo periodo se redujo a 6.30 pulgadas, lo que representó una mejora del 26.26%.

Esta reducción evidenció una fragmentación más fina y uniforme, lo cual disminuyó la presencia de bloques sobredimensionados y permitió mejorar el rendimiento del proceso de carguío. La mejora en la fragmentación fue resultado directo de la optimización de los parámetros de voladura y el incremento del factor de potencia.

4.10.4 Factor de potencia (kg/t)

El factor de potencia presentó un incremento controlado en el segundo periodo, pasando de 0.409 kg/t a 0.460 kg/t, lo que representó un aumento del 12.51%.

Este incremento permitió una mayor liberación de energía en el macizo rocoso, mejorando la eficiencia de la voladura y la calidad de la fragmentación. Asimismo, se evidenció que el aumento del factor de potencia fue determinante para reducir el tamaño de partícula y optimizar el proceso de carguío.

4.10.5 Costo unitario de minado (USD/T)

El análisis del costo unitario evidenció una reducción significativa tras la optimización del proceso. En el primer periodo, el costo promedio fue de 0.68 USD/T, mientras que en el segundo periodo se redujo a 0.57 USD/T, lo que representó una disminución del 17.39%.

Esta reducción estuvo directamente relacionada con el incremento de la productividad y la disminución de los tiempos de carguío, lo cual permitió optimizar el uso de recursos y reducir los costos operativos.

4.10.6 Análisis integral de los KPI

El análisis conjunto de los indicadores evidenció que la optimización del diseño de voladura tuvo un impacto directo en la mejora del desempeño del sistema de carguío y acarreo. La reducción del tamaño de fragmentación permitió mejorar la excavabilidad del material, lo cual redujo los tiempos de carguío y aumentó la productividad.

Asimismo, el incremento controlado del factor de potencia permitió mejorar la fragmentación sin generar impactos negativos en los costos, logrando una reducción significativa del costo unitario. En conjunto, los resultados demostraron que existe una relación directa entre la fragmentación del macizo rocoso y la eficiencia operativa del sistema, confirmando que la optimización de la voladura es un factor clave para mejorar la productividad en operaciones mineras a tajo abierto.

4.11 Contrastación de hipótesis

4.11.1 Contrastación de la hipótesis general

La hipótesis general planteó que la optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram y su validación con Split Online permitiría mejorar significativamente la productividad del proceso de carguío y acarreo.

Los resultados obtenidos confirmaron esta afirmación, evidenciando que la reducción del tamaño de fragmentación P80 de 8.54 pulgadas a 6.30 pulgadas permitió incrementar la productividad de 4,778.99 T/H a 5,793.79 T/H, lo que representó un aumento del 21.23%. Asimismo, se logró una reducción del tiempo de carguío de 3.89 a 3.07 minutos, equivalente al 21.06%, y una disminución del costo unitario de 0.68 a 0.57 USD/T, lo que representó una mejora del 17.39%.

En consecuencia, se aceptó la hipótesis general, ya que la optimización de la fragmentación del macizo rocoso tuvo un impacto directo, significativo y positivo en la productividad del sistema de carguío y acarreo.

4.11.2 Contrastación de las hipótesis específicas

Hipótesis específica 1

La aplicación del modelo Kuz-Ram permitirá estimar de manera precisa el tamaño de fragmentación P80.

Los resultados evidenciaron que el modelo Kuz-Ram estimó un P80 de 6.43 pulgadas en el segundo periodo, mientras que el valor medido mediante Split Online fue de 6.30 pulgadas, presentando una diferencia mínima del 2.02%.

Este resultado demostró una alta precisión del modelo en la estimación del tamaño de fragmentación, por lo que se aceptó la hipótesis específica 1.

4.11.3 Hipótesis específica 2

La validación de la fragmentación mediante el software Split Online permitirá corroborar la confiabilidad del modelo Kuz-Ram.

La comparación entre los resultados teóricos y los valores obtenidos en campo mediante Split Online evidenció una alta concordancia, lo que permitió validar la confiabilidad del modelo Kuz-Ram en condiciones reales de operación.

Por lo tanto, se aceptó la hipótesis específica 2, confirmando que el uso del software Split Online fue fundamental para validar los resultados obtenidos.

4.11.4 Hipótesis específica 3

La mejora de la fragmentación permitirá reducir los tiempos de carguío y aumentar la productividad.

Los resultados demostraron que la reducción del P80 permitió disminuir el tiempo de carguío de 3.89 a 3.07 minutos, lo que representó una reducción del 21.06%, y a su vez permitió incrementar la productividad en 21.23%.

Este comportamiento evidenció que existe una relación directa entre la fragmentación y la eficiencia operativa del sistema, por lo que se aceptó la hipótesis específica 3.

En conjunto, los resultados obtenidos permitieron aceptar la hipótesis general y las hipótesis específicas, demostrando que la optimización de la fragmentación del macizo rocoso, mediante el uso del modelo Kuz-Ram y su validación con Split Online, constituye una estrategia efectiva para mejorar la productividad, reducir los tiempos operativos y disminuir los costos en el proceso de carguío y acarreo en una operación minera.

4.12 Discusión general de resultados

La discusión de los resultados por indicadores clave de desempeño (KPI) evidenció que la optimización del diseño de voladura tuvo un impacto directo en la mejora de la fragmentación y, en consecuencia, en la eficiencia del proceso de carguío y acarreo. En términos de producción, el incremento de 21.23% en T/H confirmó que una adecuada fragmentación permite mejorar la excavabilidad del material y optimizar el rendimiento de los equipos. Este resultado es consistente con lo señalado por Jimeno, Jimeno y Carcedo (1995), quienes establecieron que la fragmentación es un factor determinante en la productividad de las operaciones mineras, ya que influye directamente en las etapas

posteriores del ciclo productivo. De igual manera, Sanchidrián et al. (2014) indicaron que la mejora en la granulometría del material volado permite incrementar la eficiencia del carguío y reducir pérdidas operativas, lo cual coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación.

En cuanto al tiempo de carguío, la reducción del 21.06% evidenció que una fragmentación más fina disminuye la resistencia del material, facilitando la penetración del cucharón y reduciendo el esfuerzo de los equipos. Este comportamiento guarda relación con lo expuesto por Hustrulid y Bullock (2001), quienes señalaron que la eficiencia del ciclo de carguío depende directamente de la calidad de la fragmentación. Asimismo, estudios recientes a nivel nacional han reportado resultados similares, indicando que la reducción del tamaño de partícula permite disminuir los tiempos de ciclo y mejorar la eficiencia operativa del sistema de carguío. (Torres, 2023; Rojas, 2022)

Respecto a la fragmentación (P80), la disminución del 26.26% evidenció la efectividad de la optimización de los parámetros de voladura y el uso del modelo Kuz-Ram. Este resultado es coherente con lo planteado por Cunningham (1983), quien desarrolló el modelo Kuz-Ram como una herramienta para predecir la fragmentación en función de la energía aplicada. Asimismo, la validación mediante Split Online confirmó la precisión del modelo, lo cual coincide con investigaciones recientes que destacan la importancia de los sistemas digitales de análisis de fragmentación para validar modelos teóricos en condiciones reales de operación. (Sanchidrián et al., 2014)

En relación con el factor de potencia, el incremento del 12.51% permitió mejorar la liberación de energía en el macizo rocoso, generando una fragmentación más uniforme. Este comportamiento concuerda con lo indicado por la International Society of Explosives Engineers (ISEE, 2011), donde se establece que el aumento controlado del factor de potencia mejora la fragmentación, siempre que se mantenga dentro de rangos óptimos. En este sentido,

los resultados de la presente investigación evidenciaron que el incremento del factor de potencia fue adecuado y contribuyó a optimizar el proceso sin generar efectos negativos.

Finalmente, en cuanto al costo unitario, la reducción del 17.39% evidenció que la optimización de la fragmentación no solo mejora la eficiencia operativa, sino también la rentabilidad del proceso. Este resultado es consistente con el enfoque Mine to Mill, el cual establece que una mejora en la fragmentación genera beneficios en toda la cadena productiva (Hustrulid & Bullock, 2001) Diversos estudios recientes han reportado resultados similares, indicando que la optimización de la voladura permite reducir costos operativos al mejorar la eficiencia del carguío y disminuir la necesidad de voladura secundaria. (García, 2024)

En conjunto, la discusión de los resultados por KPI permitió confirmar que la fragmentación del macizo rocoso es la variable más influyente en el desempeño del sistema de carguío y acarreo. Los resultados obtenidos no solo coinciden con la literatura especializada, sino que también aportan evidencia empírica en condiciones reales de operación, validando la efectividad del modelo Kuz-Ram y del software Split Online como herramientas clave para la optimización de procesos en minería superficial.

Conclusiones

Conclusión del objetivo general: Se concluyó que la optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante la aplicación del modelo Kuz-Ram y su validación con Split Online permitió mejorar significativamente la productividad del proceso de carguío y acarreo en la operación minera durante el año 2025. Esta mejora se evidenció en el incremento de la producción de 4,778.99 T/H a 5,793.79 T/H (+21.23%), la reducción del tiempo de carguío de 3.89 a 3.07 minutos (-21.06%) y la disminución del costo unitario de 0.68 a 0.57 USD/T (-17.39%), confirmando que la fragmentación es la variable clave que controla la eficiencia del sistema.

Conclusión del objetivo específico 1: Se concluyó que la aplicación del modelo Kuz-Ram permitió estimar de manera precisa el tamaño de fragmentación P80 en función de los parámetros de diseño de voladura. El modelo estimó un P80 de 6.43 pulgadas, valor muy cercano al obtenido en campo, lo que demostró su confiabilidad como herramienta de predicción para optimizar la fragmentación del macizo rocoso.

Conclusión del objetivo específico 2: Se concluyó que la validación de la fragmentación mediante el software Split Online permitió corroborar la confiabilidad de los resultados obtenidos con el modelo Kuz-Ram. Los valores medidos mostraron un P80 de 6.30 pulgadas, evidenciando una diferencia mínima del 2.02% respecto al valor teórico, lo cual confirmó la precisión del modelo y la efectividad del uso de herramientas digitales en la evaluación de la fragmentación.

Conclusión del objetivo específico 3: Se concluyó que la mejora de la fragmentación del macizo rocoso permitió reducir significativamente los tiempos de carguío y aumentar la productividad del sistema. La disminución del P80 de 8.54 a 6.30 pulgadas facilitó la excavabilidad del material, redujo la resistencia al carguío y optimizó el rendimiento de los

equipos, lo que se tradujo en una mejora operativa y económica del proceso de carguío y acarreo.

Se concluyó que la optimización de la voladura no solo mejora la fragmentación, sino que impacta de manera integral en todos los indicadores del sistema minero, demostrando que una adecuada gestión de la energía explosiva es fundamental para incrementar la productividad y reducir costos en operaciones a tajo abierto.

Recomendaciones

Se recomienda mantener la optimización continua de los parámetros de voladura, ajustando el burden, espaciamiento y la longitud de la carga explosiva en función de las condiciones reales del macizo rocoso, con el fin de sostener una fragmentación adecuada y maximizar la productividad del proceso de carguío y acarreo. Asimismo, se sugiere implementar de manera permanente el modelo Kuz-Ram como herramienta de diseño, debido a su capacidad para predecir el tamaño de fragmentación y optimizar la distribución de la energía en la voladura.

De igual manera, se recomienda incorporar el uso sistemático del software Split Online para el monitoreo y control de la fragmentación en tiempo real, lo que permitirá validar los resultados obtenidos y realizar ajustes oportunos en los parámetros de voladura. También se sugiere mantener el factor de potencia dentro de rangos óptimos cercanos a 0.460 kg/t, evitando incrementos excesivos que puedan generar efectos negativos como sobreexcavación o daño al macizo rocoso.

Finalmente, se recomienda fortalecer la capacitación del personal técnico y operativo en temas de voladura, fragmentación y uso de herramientas tecnológicas, así como integrar la optimización de la fragmentación dentro de un enfoque global del proceso minero, considerando su impacto en todas las etapas productivas. Asimismo, se sugiere realizar estudios complementarios en diferentes condiciones geomecánicas y evaluar el impacto económico de la optimización en el largo plazo, con el propósito de consolidar mejoras sostenibles en la productividad y eficiencia de la operación minera.

Referencias Bibliográficas

Anglo American. (2024) Quellaveco: Operación minera en Perú. Recuperado de https://peru.angloamerican.com Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Cunningham, C. V. B. (1983) The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 439–453. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Flores, L. (2021) Optimización de parámetros de voladura para mejorar la productividad en operaciones mineras superficiales. Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

García, M. (2024) Optimización de la fragmentación para mejorar la productividad en minería a tajo abierto. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

González, A.. (2023) Optimización de voladura para mejorar la fragmentación en minería a cielo abierto. Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014) Metodología de la investigación. (6.a ed.) McGraw-Hill. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Hustrulid, W., & Bullock, R. (2001) Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME) Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Kanchibotla, S. S., Valery, W., & Morrell, S. (1999) Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. Proceedings of Explo ‘99 Conference, 137–144. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Kuznetsov, V. M. (1973) The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. Soviet Mining Science, 9(2), 144–148. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Mamani, R. (2022) Mejora del rendimiento de equipos de carguío mediante optimización de la fragmentación en mina a cielo abierto. Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Martínez, J. (2021) Optimización de procesos de voladura para mejorar la fragmentación en minería. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Montgomery, D. C. (2019) Design and analysis of experiments (10th ed.) John Wiley & Sons. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1996) Mineral comminution circuits: Their operation and optimization. JKMRC, University of Queensland. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Ouchterlony, F. (2005) The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. Mining Technology, 114(1), 29–44. https://doi.org/10.1179/037178405X44539 Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Pérez, C. (2022) Relación entre fragmentación y eficiencia de carguío en minería superficial. Universidad de Chile, Santiago, Chile. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994) Rock blasting and explosives engineering. CRC Press. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Quispe, J. (2023) Optimización de la fragmentación mediante control de voladura en mina a tajo abierto. Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Rammler, E. (1933) The laws governing the fineness of powdered coal. Journal of the Institute of Fuel, 7, 29–36. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Rojas, P. (2022) Evaluación de la fragmentación mediante análisis digital en minería superficial. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Split Engineering (2023) Split-Online: Fragmentation analysis system. Recuperado de https://www.spliteng.com Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Torres, D. (2023) Aplicación del modelo Kuz-Ram para optimizar la fragmentación en mina superficial. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Torres, V., & Castillo, J. (2021) Optimización de la fragmentación en minería a cielo abierto mediante modelos predictivos. Revista de Ingeniería de Minas, 18(2), 45–58. Fecha de consulta: 06 de abril de 2026

Valery, W., & Jankovic, A. (2002) Mine to mill optimisation in mining operations. Minerals Engineering, 15(7), 469–475. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00046-6 Fecha de consulta: 06 de abril de 2026