



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Optimización del factor de carga en voladuras para reducir la fragmentación a 6.5 pulgadas y aumentar la productividad del carguío en un caso de estudio

Tesis presentada por:

Chiri Diaz, Enzo Javier

ORCID: 0009-0006-7813-7746

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Ticona Corrales, Sergio

ORCID: 0000-0002-7221-6172

Arequipa - Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 12 de Marzo del 2026

Dictamen: 015319-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 015319, presentado por:

2017205081 - CHIRI DIAZ ENZO JAVIER

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DEL FACTOR DE CARGA EN VOLADURAS PARA REDUCIR LA FRAGMENTACIÓN
A 6.5 PULGADAS Y AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD DEL CARGUÍO EN UN CASO DE ESTUDIO**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

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



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



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



OPTIMIZACIÓN DEL FACTOR DE CARGA EN VOLADURAS PARA REDUCIR LA FRAGMENTACIÓN A 6.5 PULGADAS Y AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD DEL CARGUÍO EN UN CASO DE ESTUDIO

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%	7%	0%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unap.edu.pe	6%
	Fuente de Internet	
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María	4%
	Trabajo del estudiante	
3	repositorio.unsa.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		

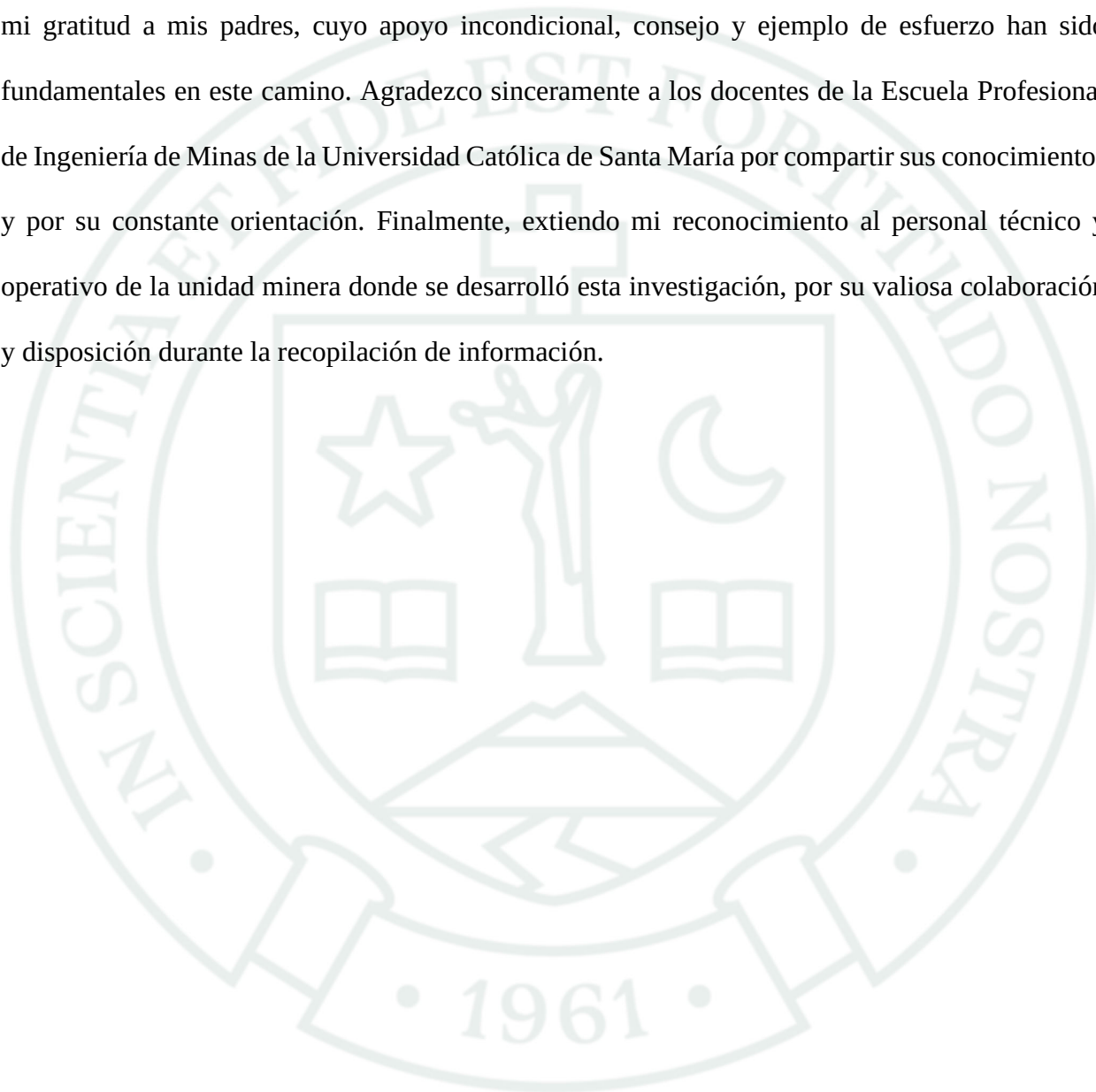
DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, pilares fundamentales en mi vida, por su amor, sacrificio y confianza inquebrantable en mí. A mi familia, por acompañarme en cada paso con palabras de aliento y apoyo constante. A mis amigos verdaderos, que supieron estar presentes incluso en los momentos más exigentes. Y finalmente, a mí mismo, por no rendirme, por creer en mi capacidad y por haber superado cada desafío con determinación.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por haberme brindado la sabiduría, salud y perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante en mi formación profesional. Expreso también mi gratitud a mis padres, cuyo apoyo incondicional, consejo y ejemplo de esfuerzo han sido fundamentales en este camino. Agradezco sinceramente a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Católica de Santa María por compartir sus conocimientos y por su constante orientación. Finalmente, extendo mi reconocimiento al personal técnico y operativo de la unidad minera donde se desarrolló esta investigación, por su valiosa colaboración y disposición durante la recopilación de información.



RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto de la optimización del factor de carga en las voladuras sobre la fragmentación del macizo rocoso y la productividad de los equipos de carguío en el caso de estudio, correspondiente a una operación a tajo abierto. Durante el primer semestre del año 2024 se registró una fragmentación promedio de 10 pulgadas, la cual fue optimizada a 6.5 pulgadas mediante ajustes técnicos en el diseño de voladura. Para ello, se aplicó el modelo empírico Kuz-Ram para estimar la granulometría esperada, y se utilizó el software Split Online para el monitoreo y validación de la fragmentación real. El análisis comparativo entre las 90 voladuras del primer periodo (sin mejora) y las 90 del segundo periodo (con mejora) permitió evidenciar un incremento del 10% en la productividad de los equipos de carguío, así como una reducción significativa del material sobredimensionado. Estos resultados confirman que una estrategia técnica adecuada en el diseño del factor de carga incide directamente en la eficiencia operativa, contribuyendo a una minería más productiva y sostenible.

Palabras clave: Factor de carga, fragmentación y productividad.

ABSTRACT

The present research aimed to evaluate the impact of optimizing the powder factor in blasting on rock mass fragmentation and the productivity of loading equipment in the case study, corresponding to an open-pit mining operation. During the first half of 2024, an average fragmentation of 10 inches was recorded, which was optimized to 6.5 inches through technical adjustments in the blasting design. For this purpose, the empirical Kuz-Ram model was applied to estimate the expected particle size distribution, and the Split Online software was used for real-time monitoring and validation of actual fragmentation. A comparative analysis between the 90 blasts from the first period (without improvement) and the 90 from the second period (with improvement) revealed a 10% increase in the productivity of the loading equipment, as well as a significant reduction in oversized material. These results confirm that a technically sound strategy in powder factor design has a direct impact on operational efficiency, contributing to a more productive and sustainable mining process.

Keywords: Charge factor, fragmentation and productivity.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN1

CAPITULO I.....3

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....3

1.1 Planteamiento del Problema3

1.2 Preguntas de Investigación4

1.2.1 Pregunta General4

1.2.2. Problemas Específicos.....4

1.3 Objetivos5

1.3.1 Objetivo General.....5

1.3.2 Objetivos Específicos5

1.4 Línea de Investigación.....5

1.5 Solución Propuesta6

1.5.1 Justificación e Importancia.....6

CAPÍTULO II9

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....9

2.1.	Estado del arte.....	9
2.1.1.	Antecedentes Locales	10
2.1.2.	Antecedentes Nacionales.....	11
2.1.3.	Antecedentes Internacionales	12
CAPÍTULO III.....		14
3.	GENERALIDADES DE LA MINA	14
3.1.	Ubicación de la Mina	14
3.2.	Accesibilidad	16
3.3.	Geología	17
3.3.1.	Geología Estructural.	17
3.3.2.	Geomecánica de las Rocas	18
3.3.3.	Mineralogía.....	20
3.3.4.	Estratigrafía	21
3.3.5.	Método de Explotación en la Caso de Estudio	21
3.3.6.	Operaciones de Minado	22
3.4.	Bases Teóricas de la Investigación.....	27
3.4.1.	Voladura de Rocas	27
3.4.2.	Factor de Carga.....	28
3.4.3.	Macizo Rocoso	28
3.4.4.	Productividad en el Carguío.....	28

3.4.5. Fragmentación del Material Volado	29
3.4.6. Diagrama de Flujo del Ciclo de Minado	29
3.4.7. Reflexión Técnica del Investigador.....	32
3.5. Definiciones.....	33
3.5.1. Voladura de Rocas	33
3.5.2. Factor de Carga.....	38
3.5.3. Fragmentación	38
3.5.4. Carguío	38
3.5.5. Acarreo	38
3.5.6. P80.....	39
3.5.7. Macizo Rocoso	39
3.5.8. Modelo Kuz-Ram	39
3.5.9. Split on line.....	39
3.5.10. Sistema de Iniciación	39
CAPITULO IV.....	40
4. MARCO METODOLÓGICO	40
4.4. Alcances y Limitaciones.....	40
4.4.1. Alcances	40
4.4.2. Limitaciones	40
4.5. Tipo y Nivel de Investigación.....	41

4.5.1. Tipo de Investigación	41
4.5.2. Nivel de Investigación	41
4.6. Hipótesis de Investigación	41
4.6.1. Hipótesis General	41
4.7. Variables.....	41
4.7.1. Variable Independiente.....	41
4.7.2. Variable Dependiente	42
4.7.3. Operacionalización de Variables	43
4.8. Población y Muestra o Universo	43
4.8.1. Población	43
4.8.2. Muestra.....	44
4.9. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	45
4.9.1. Método de la Investigación.....	45
4.9.2. Técnicas de Recolección de Datos	46
4.9.3. Instrumentos de Recolección de Datos.....	48
4.10. Plan de Análisis de los Datos	49
4.10.1. Técnicas de Análisis de Datos	49
4.11. Procedimiento de la Investigación	50
4.11.1. Revisión Documental y Diagnóstico Inicial	50
4.11.2. Aplicación del Modelo Kuz-Ram	51

4.11.3.	Implementación del Rediseño.....	51
4.11.4.	Monitoreo de la Fragmentación	51
4.11.5.	Evaluación del Impacto Operativo.....	51
4.11.6.	Análisis Estadístico	52
4.11.7.	Elaboración del Informe y Validación.....	52
CAPITULO V.....		53
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	53
5.1.	Parámetros Energéticos y Operativos Antes y Después de la Optimización	53
5.2.	Resultados	56
5.2.1.	Historial de Resultados de Periodos Antes de la Mejora	58
5.2.2.	Primer Periodo sin Mejoras (abril a junio 2024)	59
5.2.3.	Aplicación del Modelo Kuz-Ram en el Segundo Periodo	64
5.2.4.	Diseño de Malla y Voladura de la Mejora.....	67
5.2.5.	Segundo Periodo con Mejoras (Julio a Septiembre de 2024)	71
5.2.6.	Producción de Carguío (T/H).....	78
5.2.7.	Consumo de Energía (KW-H/T)	80
5.2.8.	Fragmentación del Material (P80).....	82
5.2.9.	Factor de Carga (KG/M ³)	84
5.2.10.	Costo de Trituración (USD/T).....	85
5.2.11.	Producción de Carguío (T/H) por periodo	87

5.2.12.	Consumo de Energía (KW-H/T) por periodo	89
5.2.13.	Fragmentación (KW-H/T) por periodo.....	90
5.2.14.	Factor de Carga (KW-H/T) por periodo	91
5.2.15.	Costo de Trituración (KW-H/T) por Periodo.....	93
5.2.16.	Resultados Comparativos – Primer vs Segundo Periodo	94
5.3.	Discusiones.....	96
5.4.	Contrastación de Hipótesis	97
CONCLUSIONES		99
RECOMENDACIONES		101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		103
ANEXOS		106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de la resistencia dinámica a la compresión y tracción.	19
Tabla 2. Clasificación de las rocas dominantes por dureza.....	20
Tabla 3. Cuadro comparativo de modelos de fragmentación en voladura	32
Tabla 4. Operacionalización de variables.....	43
Tabla 5. Comparación de indicadores antes y después de la optimización.....	54
Tabla 6. Estadísticos descriptivos antes y después de la optimización del factor de carga	55
Tabla 7. Resultados del análisis estadístico (prueba t para muestras independientes)	55
Tabla 8. Nomenclatura	57
Tabla 9. Resultados años anteriores a la mejora	59
Tabla 10. Resultados split on line primer periodo.....	62
Tabla 11. Parámetros del primer periodo	62
Tabla 12. Resumen de las características del macizo rocoso.	68
Tabla 13. Resumen de las características de los explosivos.....	68
Tabla 14. Resultados split on line segundo periodo	72
Tabla 15. Parámetros de segundo periodo.....	73
Tabla 16. Parámetros del primer y segundo periodo del mes 1	75
Tabla 17. Parámetros del primer y segundo periodo del mes 2	76
Tabla 18. Parámetros del primer y segundo periodo del mes 3	77
Tabla 19. Validación del modelo implementado.....	94

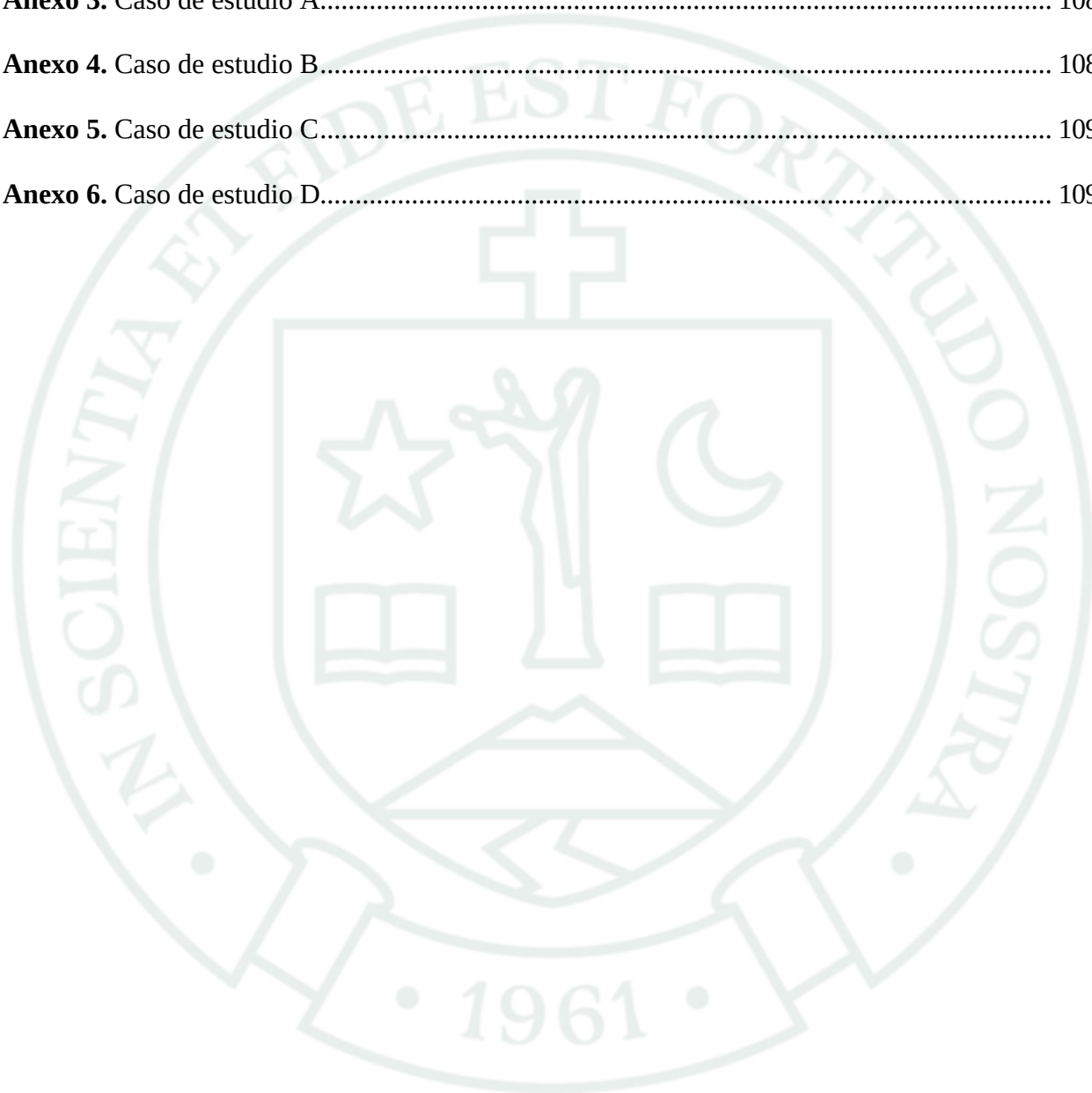
ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de ubicación.....	15
Figura 2. Vista de fase N° 05 del caso de estudio.....	16
Figura 3. Diseño de malla en minesight.....	27
Figura 4. Diagrama de flujo del ciclo de minado.....	31
Figura 5. Perforadora de 12 1/4”.....	34
Figura 6. Pala P&H 4100, Bucyrus 495HR.....	35
Figura 7. Cargado de barreno.....	36
Figura 8. Voladura controlada.....	37
Figura 9. Diseño de malla con la mejora.....	68
Figura 10. Diseño de carga.....	69
Figura 11. Perforación de producción.....	69
Figura 12. Camión fabrica.....	69
Figura 13. Secuencia de salida Fuente: Planeamiento.....	70
Figura 14. Toma Split on line en descarga chancado Fuente: Planeamiento.....	73
Figura 15. Producción del carguío.....	78
Figura 16. Consumo de energía.....	80
Figura 17. Fragmentación.....	82
Figura 18. Factor de carga.....	83
Figura 19. Costo de trituración.....	85
Figura 20. Producción de carguío por periodo.....	87
Figura 21. Consumo de energía por periodo.....	88
Figura 22. Fragmentación por periodo.....	90
Figura 23. Factor de carga por periodo.....	91



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Mina Toquepala.....	107
Anexo 2. Pala eléctrica de cable P&H 4100 operando en banco de tajo abierto.	107
Anexo 3. Caso de estudio A.....	108
Anexo 4. Caso de estudio B.....	108
Anexo 5. Caso de estudio C.....	109
Anexo 6. Caso de estudio D.....	109



INTRODUCCIÓN

En las operaciones mineras a cielo abierto, la voladura de rocas representa una de las etapas más críticas del ciclo de producción, ya que determina directamente la eficiencia del carguío, el acarreo y los procesos posteriores como chancado y molienda. Una voladura mal diseñada puede ocasionar una fragmentación deficiente del macizo rocoso, generando material sobredimensionado, bloqueos operativos, aumento en los tiempos de ciclo y reducción de la productividad global del sistema mina-planta. En ese contexto, el diseño y ajuste del factor de carga, entendido como la relación entre el explosivo empleado y la masa de roca a fragmentar, constituye una variable estratégica que influye significativamente en la calidad de la fragmentación obtenida y en el rendimiento de los equipos de carguío.

El caso de estudio, correspondiente a la Mina, ubicada en el sur del país, es una de las operaciones más representativas del país. Durante el primer semestre del 2024, se identificaron limitaciones operativas relacionadas con la fragmentación del material volado, cuya dimensión promedio alcanzaba las 10 pulgadas. Esta condición ocasionaba dificultades en el proceso de carguío, a pesar de contar con una moderna flota de palas eléctricas y volquetes de gran capacidad. En respuesta a esta problemática, se implementó un rediseño técnico del factor de carga durante el primer semestre del mismo año, aplicando el modelo empírico Kuz-Ram para estimar la granulometría y el software Split Online para su validación en tiempo real.

El presente estudio se estructura sobre la base de un análisis comparativo entre dos periodos operativos consecutivos: uno sin optimización (abril-junio 2024) y otro con mejoras aplicadas (julio-septiembre 2024). La investigación busca demostrar que una voladura técnicamente optimizada no solo reduce la fragmentación promedio de 10 a 6.5 pulgadas, sino que también permite incrementar en al menos un 10% la productividad de los equipos de

carguío, sin necesidad de modificar el parque de maquinaria ni alterar el plan de minado. Además, la mejora en la eficiencia energética y en la seguridad operativa contribuye a una operación más sostenible, rentable y alineada con las exigencias actuales de la industria minera moderna.



CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

El caso de estudio, que opera bajo un modelo de tajo abierto con una meta de producción de 120,000 toneladas por día (tpd), enfrenta dificultades operativas vinculadas a la fragmentación deficiente del macizo rocoso tras las voladuras. Durante el primer semestre del año 2024, se observaron tamaños promedio de fragmentación cercanos a las 10 pulgadas, lo que ha generado cuellos de botella en el proceso de carguío, reduciendo la eficiencia del sistema mina-planta. Estas deficiencias se traducen en un incremento de los tiempos de ciclo, desgaste acelerado de equipos y mayor frecuencia de voladuras secundarias.

En este contexto, se identifica que el diseño actual del factor de carga no se ajusta adecuadamente a las características litológicas ni a las condiciones estructurales del terreno, provocando una distribución energética ineficiente durante la voladura. La situación es más crítica al considerar que, a pesar de contar con una flota de carguío moderna, como palas eléctricas de cable P&H 4100 (51–56 yd³), Bucyrus 495HR (73 yd³) y cargadores frontales L-1400 (28 yd³), y una robusta flota de acarreo con 88 volquetes de alta capacidad (Komatsu 980E-4 y Caterpillar 797F, de hasta 363 toneladas), la productividad real no alcanza los niveles proyectados.

Este desbalance operacional evidencia que la tecnología y el parque de equipos disponibles no son suficientes para compensar una fragmentación inadecuada del material volado. Incluso con sistemas avanzados de monitoreo como Dispatch y redes LTE con capacidad 5G, las condiciones del material afectado por voladuras mal diseñadas continúan limitando la eficiencia operativa.

Ante este escenario, se propone la optimización del factor de carga como estrategia de mejora, aplicando criterios geotécnicos específicos del macizo rocoso y utilizando el modelo empírico Kuz-Ram para predecir el comportamiento de la fragmentación. Asimismo, se implementará el software Split Online para realizar un control continuo y preciso del tamaño de partícula post-voladura. La intervención buscará reducir la fragmentación de 10 a 6.5 pulgadas, lo que se estima permitirá incrementar en al menos un 10% la productividad de los equipos de carguío, sin recurrir a una ampliación del parque de equipos ni alterar el plan minero.

La investigación se estructurará mediante un análisis comparativo entre un periodo de operación sin intervención (primer semestre 2024) y otro con la aplicación de mejoras (primer semestre 2024), en condiciones controladas y dentro de la misma unidad minera. El estudio busca demostrar que una voladura técnicamente optimizada no solo mejora la fragmentación del material, sino que también maximiza el aprovechamiento del sistema de carguío, asegurando una operación más eficiente, rentable y sostenible.

1.2 Preguntas de Investigación

1.2.1 Pregunta General

- ¿Cuál es el efecto de la optimización del factor de carga en la voladura de rocas sobre la fragmentación y la productividad de los equipos de carguío en el caso de estudio?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo influye la optimización del factor de carga en la reducción del tamaño de fragmentación del macizo rocoso en el caso de estudio?

- ¿Qué relación existe entre la fragmentación obtenida mediante el modelo Kuz- Ram y los resultados registrados con el software Split Online antes y después de la mejora?
- ¿En qué medida la mejora en la fragmentación del material volado impacta en la productividad conjunta de los equipos de carguío en la operación minera?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar el impacto de la optimización del factor de carga en la voladura de rocas sobre la fragmentación del macizo y la productividad de los equipos de carguío en el caso de estudio, durante el año 2024.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar el efecto de la optimización del factor de carga en la reducción del tamaño de fragmentación del material volado, aplicando el modelo Kuz-Ram.
- Medir y comparar la fragmentación obtenida mediante el software Split Online en los periodos antes y después de la implementación de mejoras en el factor de carga.
- Determinar el incremento en la productividad de los equipos de carguío asociado a la mejora de la fragmentación del material desde 10 a 6.5 pulgadas.

1.4 Línea de Investigación

La presente investigación se enmarca en la línea de optimización de procesos mineros, orientada al análisis y mejora de las operaciones unitarias en minería a cielo abierto. En particular, se centra en la etapa de voladura como proceso clave para influir en la eficiencia global del sistema de carguío. A través de la aplicación del modelo empírico Kuz-Ram y el uso del software Split Online, esta investigación busca generar conocimientos aplicables que

permitan una mejor toma de decisiones técnicas sobre el diseño del factor de carga, contribuyendo así al incremento de la productividad operativa con criterios de eficiencia, sostenibilidad y control de costos.

1.5 Solución Propuesta

1.5.1 Justificación e Importancia

Justificación técnica: La eficacia de la voladura tiene una correspondencia directa con el diseño del factor de carga, que puede ser entendido como la relación entre la masa de explosivo que se emplea y el volumen o masa de roca a fragmentar, es decir, la unidad de peso de explosivo por cada unidad de roca. Desde el punto de vista técnico, un factor de carga mal diseñado puede dar lugar a fragmentaciones inadecuadas, que pueden ser determinantes en la continuidad de explotación de los equipos de carguío, que puede valorarse a partir del ajuste de dicho factor, pero también de la dureza del macizo rocoso o del estado de las condiciones geotécnicas del tajo. Entonces, un mejor ajuste del factor de carga, en función de la dureza del macizo rocoso y de las condiciones geotécnicas de dicho tajo, acaba permitiendo fragmentaciones más homogéneas, disminuyendo el material sobredimensionado y mejorando el rendimiento de los equipos posteriores (Jimeno et al., 1995).

Justificación de manera operacional: Desde el punto de vista operacional, una fragmentación eficaz del material volado produce menos ciclos de trabajo de los equipos de carguío y transporte, menos tiempo/ciclo y, por lo tanto, más unidades de producción diaria. El no tapar el cucharón o la realización de voladuras secundarias permite aprovechar mejor los recursos operativos y el tiempo, la disminución de los tiempos muertos, la mejora en el cumplimiento del plan de minado diario y evitar desbalance entre las fases mina-planta (Cunningham, 2005).

Justificación económica: Económicamente, la mejora del factor de carga del material volado conlleva una disminución en los costos operativos, mantenimientos no programados por desgaste prematuro de la maquinaria y el tiempo improductivo de los equipos. Una fragmentación óptima propicia un mejor aprovechamiento energético del carguío y también mejora la tasa de alimentación al chancado primario, lo que se traduce en una mejor productividad general de la unidad minera. Los beneficios asociados se traducen en un impacto positivo en los márgenes de rentabilidad del proyecto (Hustrulid et al., 1999).

Justificación social, la optimización del factor de carga en las voladuras contribuye a mejorar las condiciones laborales del personal operativo al reducir los riesgos asociados a bloqueos, rebotes de material y sobreesfuerzos en las tareas de carguío. Una mejor fragmentación disminuye la necesidad de forzadas con maquinaria pesada, lo cual incide directamente en la seguridad ocupacional y en la disminución de accidentes laborales en el tajo. Además, al generar una operación más eficiente, se promueve la sostenibilidad de los puestos de trabajo en la comunidad y se fortalece la estabilidad económica de la zona de influencia minera, dado que operaciones más productivas tienden a extender su horizonte de vida útil (Kecojevic & Komljenovic, 2011).

Justificación de seguridad y ambiental, la optimización del factor de carga en la voladura no solo tiene implicancias técnicas y operativas, sino que también representa una medida clave para fortalecer la seguridad laboral y minimizar los impactos ambientales. Desde el punto de vista de la seguridad, un diseño adecuado del factor de carga permite reducir la generación de bloques sobredimensionados, evitando riesgos asociados al manipuleo de estos materiales, al uso de explosivos en voladuras secundarias y a los esfuerzos excesivos en los equipos de carguío. De este modo, se disminuye la exposición de los operadores a situaciones

peligrosas como rebotes del cucharón, deslizamientos en el frente de carga o caídas de rocas, promoviendo así un entorno de trabajo más estable y seguro (Kecojevic & Komljenovic, 2011). Al mismo tiempo, un factor de carga correctamente ajustado contribuye a minimizar los efectos colaterales de la voladura, como las vibraciones, emisiones de polvo y proyecciones indeseadas. La mejora de la fragmentación reduce la necesidad de retrabajos y voladuras adicionales, lo que a su vez disminuye el consumo energético y el uso de combustibles fósiles, favoreciendo una minería más sostenible y alineada con las normativas ambientales vigentes (Sanchidrián et al., 2012).



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del arte

La optimización de los procesos de voladura en minería a cielo abierto ha sido objeto de múltiples estudios, debido a su impacto directo en la eficiencia operativa, la fragmentación del material y los costos del proceso mina-planta. Una adecuada relación entre el diseño de voladura y el comportamiento del macizo rocoso permite maximizar la energía útil del explosivo, mejorando así la fragmentación y reduciendo los esfuerzos en las etapas posteriores de carguío y chancado.

Jiménez (2018), en su estudio desarrollado en la Universidad de Chile, concluyó que la mejora en las prácticas de perforación y voladura incide significativamente en la reducción del tamaño del fragmento y en los costos unitarios del proceso. La aplicación del modelo Kuz-Ram y otras herramientas predictivas permite un diseño técnico más eficiente y alineado con los objetivos operacionales.

En la misma línea, Salinas (2022), en la Universidad Continental, aplicó el enfoque Mine-to-Mill para analizar cómo las variables de perforación y voladura influyen en el rendimiento de los equipos de carguío. Su investigación demostró que ajustes en el factor de carga y en la secuencia de detonación contribuyen a mejorar la fragmentación, logrando una mayor fluidez en el proceso de carguío y reducción en los tiempos de ciclo.

Por su parte, Casani (2022) evaluó el control del grado de fragmentación desde un enfoque técnico-económico, y determinó que un diseño de voladura optimizado puede mantener los costos sin incremento significativo, al tiempo que mejora el desempeño general

de la operación minera. Esta evidencia respalda que una fragmentación controlada es clave para la eficiencia del sistema.

Chura (2021), en su tesis sobre voladura controlada en minas superficiales, destacó que el diseño adecuado del factor de carga también tiene implicancias en la estabilidad del banco y en la reducción de riesgos operacionales, lo que demuestra que una voladura técnica no solo tiene beneficios productivos, sino también en seguridad y sostenibilidad.

Finalmente, Montoya (2019) demostró en el caso de estudio que ajustes técnicos en perforación pueden reducir el costo del ciclo de minado. Esta tesis, al enfocarse en la optimización del factor de carga, se posiciona como una continuación de tales esfuerzos, incorporando herramientas modernas como Split Online para la validación de la fragmentación y orientando sus resultados a mejorar la productividad del carguío y reducir los costos asociados al procesamiento.

En conjunto, estos estudios evidencian que el diseño adecuado del factor de carga, basado en parámetros técnicos y validado en campo, es una herramienta crítica para lograr una minería eficiente, productiva y competitiva. La presente investigación se inserta en este marco de conocimiento al aplicar dicha optimización en el caso de estudio, demostrando su efecto cuantificable sobre los indicadores operativos clave.

2.1.1. Antecedentes Locales

Según Montoya Villalta, F. A. (2019), en su tesis “Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en Toquepala - Southern Perú Copper Corporation 2018”. Arequipa: Universidad Católica de Santa María. Repositorio UCSM. El objetivo de esta tesis fue exponer la factibilidad de reducir los costos del ciclo de minado mediante la aplicación de estándares mejorados en las operaciones de perforación y

voladura. Este antecedente resulta relevante para la presente investigación, ya que evidencia que los ajustes técnicos en las operaciones iniciales del ciclo de producción pueden generar mejoras significativas en el desempeño global. En esa misma línea, la presente tesis busca extender dicha lógica de optimización hacia la etapa de voladura, centrando el análisis en el rediseño del factor de carga para mejorar la fragmentación del macizo rocoso y, con ello, incrementar la productividad de los equipos de carguío en la misma unidad minera.

Según Chura Torres, O. (2021), en su tesis “Aplicación de voladura controlada para mejorar la estabilidad de las paredes y taludes de banco en las fases de minado del tajo Tipo A”. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Esta investigación tuvo como objetivo reducir los costos de servicios auxiliares y minimizar los riesgos por caída de rocas causados por la sobrerotura en las paredes y taludes de banco del tajo Tipo A. Este antecedente refuerza la importancia de adaptar los parámetros de voladura a las condiciones geotécnicas específicas del macizo rocoso, no solo para garantizar la seguridad en el tajo, sino también para optimizar los resultados operativos. En coherencia con este enfoque, la presente investigación plantea la optimización del factor de carga como una medida técnica que, además de mejorar la fragmentación del material volado, busca elevar la productividad de los equipos de carguío bajo criterios de eficiencia y estabilidad operativa.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Según Casani Huamaní, J. C. (2021), en su tesis “Análisis técnico y económico de perforación y voladura para el control del grado de fragmentación en una mina a tajo abierto – 2021”. Huancayo: Universidad Continental. El objetivo de esta tesis fue controlar el grado de fragmentación post voladura mediante un análisis técnico y económico de las operaciones de perforación y voladura en una mina a tajo abierto durante el año 2021. Este estudio valida

la importancia de ajustar técnicamente las operaciones iniciales del ciclo de minado para lograr una fragmentación adecuada que permita mejorar el rendimiento global de la operación. En línea con este enfoque, la presente investigación propone optimizar el factor de carga como variable clave para obtener una fragmentación controlada, lo que permitirá mejorar la eficiencia de los equipos de carguío, sin incrementar los costos operativos.

Según Salinas Canal, K. R., & Ninahuanca Chumbe, J. R. (2022), en su tesis “Análisis de las variables operacionales de perforación y voladura, y su incidencia en el rendimiento de equipos de carguío, bajo el concepto mine to mill en una mina a tajo abierto – 2021”. Huancayo: Universidad Continental. Esta investigación tuvo como objetivo mejorar el rendimiento de los equipos de carguío mediante el análisis de las variables operacionales de perforación y voladura, aplicando el concepto mine to mill en una mina a tajo abierto durante el año 2021. Su investigación demostró que una adecuada planificación y ejecución de estas variables mejora notablemente la eficiencia operativa en el carguío, lo que respalda el planteamiento de que las etapas iniciales del ciclo minero tienen un impacto directo en el desempeño posterior. La presente tesis retoma esa lógica, pero centra su atención específicamente en la optimización del factor de carga como variable crítica para mejorar la fragmentación y, aumentar la productividad de los equipos de carguío en el caso de estudio.

2.1.3. Antecedentes Internacionales

Según Jiménez, A. R. (2018), en su tesis “Optimization of Drilling and Blasting Practices in Open-Pit Mining Operations”. Santiago: Universidad de Chile. El objetivo de esta tesis fue optimizar las prácticas de perforación y voladura en operaciones mineras a cielo abierto para mejorar la fragmentación del material y reducir costos operativos. En concordancia con estos hallazgos, la presente tesis plantea la optimización del factor de carga como una

medida técnica esencial para obtener mejores resultados de fragmentación y, a su vez, incrementar la productividad de los equipos de carguío en el caso de estudio, sin necesidad de incurrir en mayores costos.

Según Smith, J. D. (2019), en su tesis “Evaluation of Controlled Blasting Techniques to Improve Slope Stability in Open-Pit Mines”. Brisbane: The University of Queensland. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar técnicas de voladura controlada para mejorar la estabilidad de los taludes en minas a cielo abierto. Su estudio demostró que una adecuada configuración de la voladura no solo contribuye a la seguridad geotécnica del tajo, sino que también mejora la eficiencia operativa al reducir intervenciones correctivas y retrabajos. En esa misma línea, la presente tesis propone la optimización del factor de carga como una estrategia complementaria que, además de mejorar la fragmentación del material volado, busca contribuir a una operación más estable y eficiente en los procesos de carguío dentro del caso de estudio.

CAPÍTULO III

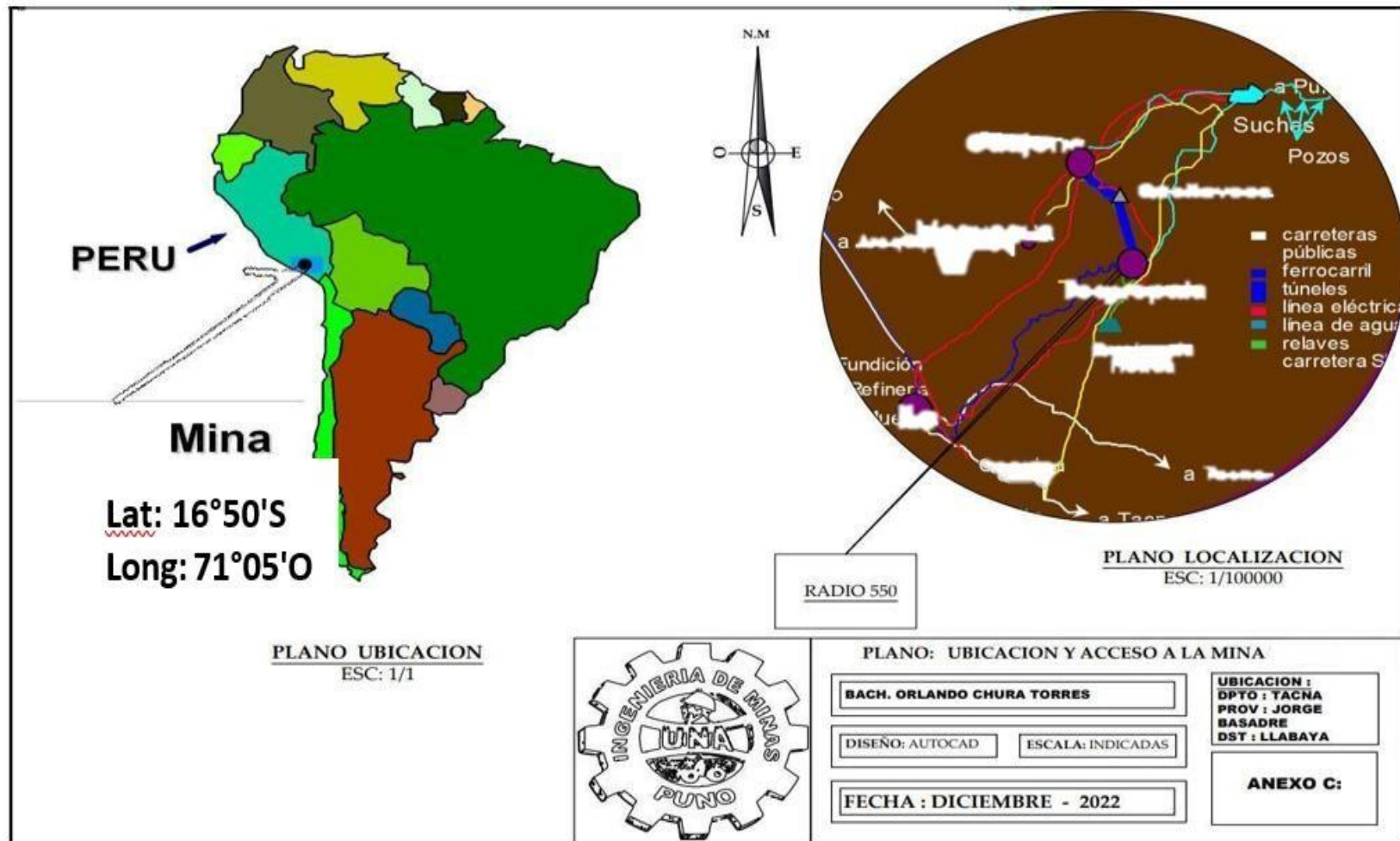
3. GENERALIDADES DE LA MINA

3.1. Ubicación de la Mina

El caso de estudio se encuentra en la zona sur del país, dentro de una región destacada por su intensa actividad minera. Su localización geográfica se ubica aproximadamente entre las coordenadas 16°50' de latitud sur y 71°05' de longitud oeste, con una altitud que oscila entre los 2,700 y 3,100 metros sobre el nivel del mar. La operación minera forma parte de un importante clúster cuprífero del sur andino, reconocido por la presencia de yacimientos tipo pórfido cuprífero de alto valor económico. Su ubicación estratégica facilita la conexión con centros logísticos y de transporte, optimizando los procesos operativos y de distribución del mineral.

Figura 1.

Plano de ubicación



Nota: Extraído de Aplicación de voladura controlada para mejorar la estabilidad de las paredes y taludes de banco en las fases de minado del tajo Tipo A, por O. Chura Torres, 2022, Repositorio Institucional UNAP.

Figura 2.

Vista de fase N° 05 del caso de estudio



Nota: Extraído del área de planeamiento de la mina del caso de estudio

3.2. Accesibilidad

La unidad minera presenta una excelente accesibilidad terrestre. El acceso principal se realiza a través de una carretera asfaltada que conecta directamente con las instalaciones mineras. Adicionalmente, existen rutas internas perfectamente acondicionadas para el tránsito de equipos pesados, volquetes de gran tonelaje, vehículos livianos y maquinaria de soporte. La infraestructura vial dentro del yacimiento está diseñada para conectar áreas operativas claves como frentes de carguío, zonas de perforación y voladura, botaderos, planta concentradora y talleres de mantenimiento. Esta conectividad garantiza eficiencia en las operaciones logísticas, minimiza los tiempos muertos y asegura la disponibilidad permanente de los equipos de carguío y acarreo.

- Lima: 1020 Km.
- Arequipa: 400 Km.

- Tacna: 100 Km.
- Moquegua: 100 Km.

3.3. Geología

Desde el punto de vista geológico, La unidad minera se encuentra en el cinturón magmático andino, dentro del dominio de pórfidos cupríferos del sur del Perú. El yacimiento está hospedado en una intrusión de cuarzo-monzonita y diorita cuarzosa, que presenta una mineralización diseminada y en vetillas. Esta intrusión está relacionada con eventos del Paleógeno, y afecta a rocas volcánicas. La mineralización primaria se distribuye de manera zonificada, controlada estructuralmente por fracturas, fallas regionales y contactos litológicos. El macizo rocoso presenta una competencia mecánica alta, con dominios geotécnicos que influyen directamente en el diseño de la malla de perforación y el factor de carga aplicado en cada fase. Las alteraciones hidrotermales principalmente potásica, fílica y argílica definen zonas con distinta tenacidad y comportamiento frente a la energía explosiva.

3.3.1. Geología Estructural.

Dentro de la geología estructural, existen dos fallas principales en el caso de estudio que afloran nítidamente afectando al stock de Diorita Granodiorita y rocas volcánicas. Estas fallas son:

- **Falla Incapuquio:** Es la mayor estructura regional que se proyecta por el Sur del caso de estudio, esta falla evidencia el tectonismo en el Sur del Perú. Aflora en toda la región en el Oeste con un espesor de 100 metros, presentando zonas de panizo, brechas y un intenso fracturamiento.
- **Falla Micalaco:** Esta estructura regional localizada en la zona central del lado oeste y parte inferior oeste con una orientación promedio de N 56° 0 y un buzamiento

subvertical tiene un recorrido rectilíneo; regionalmente tiene una longitud de 21 Km; presentando una ancha zona de cizallamiento entre 200 y 250 m, acompañado de fracturamiento y brechamiento, la mayor parte del movimiento de esta estructura ha tenido lugar posiblemente, durante el Terciario Inferior.

3.3.2. Geomecánica de las Rocas.

En el caso de estudio se caracterizado muchas de las propiedades mecánicas de las rocas predominantes, no obstante, de acuerdo a la necesidad de este estudio, solo se detallan dos propiedades que influyen en el diseño de los taladros de precorte y recorte, estas propiedades son:

3.3.2.1. Resistencia Dinámica a la Compresión y Tracción (UCS + RT).

La resistencia dinámica a la compresión (UCS) define la fuerza o carga por unidad de superficie bajo la cual una roca fallará por corte o cizalla (presión). Existen diversos factores que influyen a la resistencia a la compresión como: textura, tamaño de granos, forma de los granos, y la presencia de agua dentro del macizo rocoso. En tanto, la resistencia dinámica a la tracción se define como la condición de rotura que tiene la roca cuando la velocidad de los esfuerzos es muy alta, generado por la compresión y dando paso a la tensión, esta última fuerza es la que produce la rotura en la tracción. Véase en la siguiente tabla estas propiedades para algunas rocas dominantes:

Tabla 1.*Valores de la resistencia dinámica a la compresión y tracción.*

Tipo de Roca	Símbolo	UCS Mpa	RT Mpa
Diorita argilizada	Di	77.69	10.5
Brecha angular argilizada	Bx-Qs	125.16	11.89
Pebble brecha argilizada	Px	44.79	4.93
Latita porfirítica	Lp	107.48	17.2
Dacita porfirítica silicificada	Dp-Sil	129.91	16.91
Dacita aglomerada	Da	103.8	14.32
Andesita	Ta	179.92	22.49
Dacita porfirítica argilizada	Dp	30.42	4.03
Cuarzo Quellaveco silicificada	Qq	118.17	15.97
Brecha angular silicificada	Bx-Sil	94.52	13.13
Riolita	Tr	136.06	18.14
Pebble brecha silicificada	PxSil	95.3	13.18
Dacita porfirítica con yeso anhidrita	Dp-G/A	152.97	18.43
Brecha angular silicificada con turmalina y yeso a.	BxT-G/A	174.18	8.61
Brecha angular silicificada con turmalina	Bxt	138.67	17.78

Nota: Extraído del área de planeamiento de la mina del caso de estudio.**3.3.2.2. Clasificación de la Dureza (DR).**

La dureza de la roca es una propiedad mecánica referencial que deriva de la resistencia dinámica a la compresión. Es importante para valorizar las rocas dominantes en un pequeño grupo de valores alfanuméricos más clásicos que se utilizan en perforación y en muchas fórmulas/modelos matemáticos para determinar las dimensiones de la malla de voladura. Véase en la siguiente tabla esta clasificación para la Caso de estudio:

Tabla 2.*Clasificación de las rocas dominantes por dureza.*

Tipo de Roca	Símbolo	Clasificación DR
Andesita	Ta	Dura
Dacita porfirítica con yeso anhidrita	Dp-G/A	
Brecha angular silicificada con turmalina y yeso a.	BxT-G/A	
Riolita	Tr	
Dacita aglomerada	Da	
Brecha angular silicificada con turmalina	Bxt	Media Dura
Cuarzo Quellaveco silicificada	Qq	
Latita porfirítica	Lp	Media
Dacita porfirítica silicificada	Dp-Sil	
Pebble brecha silicificada	PxSil	
Brecha angular silicificada	Bx-Sil	
Diorita argilizada	Di	Suave
Brecha angular argilizada	Bx-Qs	
Pebble brecha argilizada	Px	Muy Suave
Dacita porfirítica argilizada	Dp	

Nota: Extraído del área de planeamiento de la mina del caso de estudio.**3.3.3. Mineralogía**

La mineralogía del yacimiento está dominada por minerales de cobre primarios como calcopirita y bornita, acompañados por molibdenita y, en menor proporción, pirita. En las zonas superiores oxidadas se encuentran minerales secundarios como crisocola, malaquita y cuprita, asociados a zonas de lixiviación y enriquecimiento supergénico. Esta diversidad mineralógica determina la distribución de durezas en el yacimiento y condiciona el rendimiento tanto en la voladura como en los procesos posteriores de conminución. La presencia de sulfuros duros en las zonas profundas requiere una planificación específica del diseño de voladura, incluyendo la elección del tipo de explosivo, el diámetro de taladro y la carga por metro lineal.

3.3.4. Estratigrafía

Estratigráficamente, la mina en el caso de estudio está compuesta por unidades volcánicas, principalmente andesitas, tobas y flujos lávicos andesíticos, instruidas por cuerpos plutónicos del Paleógeno. Estas unidades están intensamente afectadas por alteraciones hidrotermales, generando contrastes litológicos y texturales que inciden directamente en la fragmentabilidad del macizo rocoso. A nivel estructural, el área presenta un patrón complejo de fracturas y diaclasas que actúan como planos de debilidad o zonas de concentración de tensión durante la voladura. Estas características estratigráficas son fundamentales para definir la estrategia de optimización del factor de carga, ya que determinan la distribución de energía necesaria para lograr una fragmentación uniforme y eficiente.

3.3.5. Método de Explotación en la Caso de Estudio

Se emplea el método de explotación a tajo abierto por bancos múltiples, el cual es ideal para depósitos masivos como los porfíricos de cobre que presenta este yacimiento. Este sistema permite la extracción progresiva y ordenada del mineral y del material estéril, garantizando la estabilidad de las paredes del tajo y la eficiencia operativa.

3.3.5.1. Características Principales.

- Forma del tajo: El tajo adopta una geometría escalonada (en bancos), diseñada con base en estudios geotécnicos y económicos.
- Altura de bancos: Generalmente de 15 metros, aunque pueden variar dependiendo del diseño del tajo y la fragmentación deseada.
- Accesos: Se utilizan rampas en espiral para el tránsito de los equipos de acarreo (camiones mineros de gran tonelaje).
- Secuencia de minado: Se aplica una explotación secuencial por fases o pushbacks,

que permite exponer progresivamente el mineral con una adecuada relación estéril/mineral (stripping ratio).

3.3.5.2. Equipos Principales.

- Perforadoras rotativas y de martillo en fondo para la preparación de los bancos. Palas eléctricas y cargadores frontales para el carguío.
- Camiones mineros de 240–320 toneladas para el transporte.
- Tipo de roca: Andesitas, dioritas y otras rocas ígneas intermedias, lo que exige un diseño adecuado del patrón de voladura para obtener una fragmentación óptima y minimizar el uso de voladura secundaria.

3.3.5.3. Ventajas del Método a Cielo Abierto.

- Permite una alta tasa de producción, con menores costos unitarios en comparación con métodos subterráneos.
- Facilita el uso de tecnologías modernas, como sistemas de despacho automatizado, análisis de fragmentación en línea y perforación controlada.
- Mejora la seguridad operativa, ya que los frentes de trabajo son más accesibles y monitoreables.

3.3.6. Operaciones de Minado

El desarrollo integral de las operaciones unitarias de la mina todas ellas, se desarrollan, teniendo presente los procedimientos de trabajo, los cuales implican, efectuar un trabajo con todos los estándares de seguridad y productividad. Estas operaciones unitarias son:

3.3.6.1. Perforación.

El primer paso del minado consiste en efectuar taladros donde se alojan el explosivo, estos taladros se realizan a través de una flota de perforadoras de diferentes marcas y modelos. Es importante efectuar esta operación con la mayor exactitud del caso, en lo que respecta a profundidad, coordenada exacta, paralelismo y perpendicularidad, todo esto repercutirá en la obtención de una fragmentación requerida y control en las paredes finales del tajo.

Los equipos que operan en la operación de perforación en el tajo son:

- Tres perforadoras eléctricas P&H 100XP.
- Una perforadora eléctrica P&H 120.
- Tres perforadoras eléctricas Bucyrus 49R-III.
- Tres perforadoras eléctricas Bucyrus 49HR.
- Una perforadora Down the Hole (DTH) Titon 600 para precorte.
- Tres perforadoras Cubex 1120 (Sandvik) – precorte.

Todas estas perforadoras operan en dos sub grupos de perforación las cuales son:

Perforación para producción y recorte: Los parámetros de perforación, están diseñados en función a las características geomecánicas y estructurales de los macizos rocosos:

- Diámetro de perforación: 11 y 12 ¼ pulgadas.
- Malla de perforación: Patrón triangular equilátero de 6.5 m a 12 m.
- Longitud de perforación: 16.50 m.
- Sobreperforación: de 1.5 a 2.0 m.

Perforación para precorte: Los parámetros de perforación, están diseñados en función a las características geomecánicas y estructurales de los macizos rocosos:

- Diámetro de perforación: 5.0 pulgadas.
- Espaciamiento de taladros: de 0.8 m a 2.0 m.
- Longitud de perforación: 16 m.
- Inclinação: de 65° a 80°.

3.3.6.2. Voladura.

La voladura es la más importante de las actividades del ciclo de minado, ya que el caso de estudio que es un yacimiento de pórfidos de cobre, tiene una antigüedad de más de 40 años, lo cual hace que en la actualidad se esté trabajando en niveles más profundos donde debemos tener cuidado con parámetros de vibración y obtener paredes estables que soporten la carga portante de los niveles superiores para llevar una operación de minado dentro de los estándares de seguridad, calidad y productividad.

En el caso de estudio se llevan a cabo dos tipos de voladura: voladura primaria o de producción y la voladura para paredes finales o contorno, donde en esta ultima el carguío de explosivo se realiza de forma controlada y en menor proporción que en voladura de producción a fin de no dañar las paredes del tajo. Para los disparos primarios se emplea el explosivo Quantex 73, los cuales son cargados a los taladros por medio de camiones mecanizados de 20 ton, mientras que, para el disparo de contorno se utiliza el Famecorte.

3.3.6.3. Carguío.

Es otra actividad que tiene también una mayor importancia en el ciclo de minado. El carguío consiste en el recojo del material ya fragmentado para depositarlo seguidamente en los volquetes quienes lo conducen a distintos destinos, si se trata de mineral este se transporta

a planta de chancado, si se trata de mineral de baja ley para lixiviación, y le desmonte para el botadero. Los equipos carguío que operan en el tajo son:

Una pala P&H 4100+ de 60 yd³.

- Dos palas P&H 4100^a de 56 yd³.
- Una pala Bucyrus 495B1 de 56 yd³.
- Tres palas Bucyrus 495HR de 73 yd³.
- Un cargador frontal CAT 994F de 23 yd³.
- Un cargador Le Tourneau L1850.
- Un cargador Le Tourneau L2350.

3.3.6.4. Transporte.

El sistema de transporte se realiza con el uso de volquetes de acarreo de distintas capacidades. Este proceso de carguío del camión es directo de la pala y estos camiones se dirigen a los diferentes botaderos, tolvas de mineral lixiviable y la chancadora MT.

No existe el sistema pala camión directo a concentradora porque esta se encuentra a 5 Km de la misma, por lo que, esta distancia no es aconsejable para el óptimo aprovechamiento económico de los camiones, que solo se puede usar en distancias menores 3.5 Km únicamente. Hasta finales del año 2015 se usaban los trenes para el transporte de mineral desde las tolvas, hoy por hoy, el transporte se realiza por fajas que se ubican en un túnel subterráneo.

En lo referente a las rampas de tránsito de los camiones, estas no exceden al 8% dentro de la mina, y aun menor las rampas de acceso a las carreteras que constituyen el recorrido regular de los camiones cuando se encuentran acarreando. Los equipos transporte que operan en el tajo son:

- 28 Volquetes Komatsu 930E1, E3 y E4 de 290 TM.
- 15 Volquetes Caterpillar 793C de 218 TM.
- 13 Volquetes Caterpillar 793D de 218 TM.
- 8 Volquetes Caterpillar 797F de 363 TM.
- 18 Volquetes Komatsu 830 de 218 TM.

3.3.6.5. Servicios Auxiliares.

Los equipos de servicios auxiliares tienen la finalidad de dar soporte a las demás operaciones unitarias, también están encargados de efectuar los trabajos de limpieza, desarrollo y construcción. Los equipos de servicios auxiliares que operan en el tajo son:

- Un tractor de oruga CAT D11R.
- Un tractor de oruga CAT D10 N.
- Dos tractores de oruga CAT D10R.
- Cuatro tractores de oruga CAT D10 T.
- Un tractor de oruga Komatsu D375A.
- Dos Motoniveladoras CAT 24H.
- Una motoniveladora CAT 24M.
- Dos tractores de llanta CAT 844C.
- Seis tractores de llantas 834H.
- Un rompedor de roca PC300.
- Cuatro tanques de regadío de 20,000 galones.
- Un tanque de regadío de 30,000 galones.

3.4.2. Factor de Carga

El factor de carga, entendido como la cantidad de explosivo utilizada por unidad de volumen o tonelaje de roca (kg/m^3 o KG/M^3), es uno de los parámetros más críticos en el diseño de voladuras. Un valor mal calculado puede generar sobreroturas, vibraciones innecesarias y una fragmentación deficiente; por el contrario, un factor de carga adecuadamente ajustado permite maximizar la eficiencia de la fragmentación y reducir costos operativos en la operación minera (Hustrulid, McCarter & Van Zyl, 1999).

3.4.3. Macizo Rocosó

El macizo rocoso es el medio geológico donde se realiza la voladura, y su comportamiento estructural y mecánico condiciona los resultados del proceso. Factores como la resistencia, el grado de fracturamiento, la orientación de las discontinuidades y el grado de alteración determinan la forma en que la energía del explosivo se distribuye y fragmenta la roca. Por ello, conocer y clasificar adecuadamente el macizo permite adaptar los parámetros de voladura a cada condición geotécnica (Bieniawski, 1989).

3.4.4. Productividad en el Carguío

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

3.4.5. Fragmentación del Material Volado

La fragmentación es el resultado del proceso de voladura y se evalúa mediante indicadores como el P80, que representa el tamaño por debajo del cual se encuentra el 80% del material fragmentado. Este indicador permite determinar la eficiencia del diseño de voladura y su adecuación a las capacidades de carguío y chancado. Una fragmentación uniforme reduce la necesidad de voladuras secundarias y mejora el flujo continuo de material hacia planta (Cunningham, 2005).

3.4.6. Diagrama de Flujo del Ciclo de Minado

El ciclo de minado constituye la secuencia operativa fundamental en una operación a tajo abierto, integrando diversas fases que se ejecutan de manera secuencial y coordinada para asegurar la continuidad de la producción. Análisis crítico de los modelos aplicados a la fragmentación en voladura

Durante el desarrollo de esta investigación, se efectuó una revisión técnica y comparativa de los principales modelos teóricos empleados en la predicción de la fragmentación generada por voladura, con el propósito de seleccionar el más adecuado para las condiciones operativas de la mina en el caso de estudio. Este análisis incluyó los enfoques propuestos por Cunningham (modelo Kuz-Ram), Ash, Sanchidrián, y la variante Kuznetsov–Cunningham (1996).

El modelo Kuz-Ram se posicionó como el más pertinente para el presente estudio debido a su capacidad de relacionar variables operativas clave —como la altura del banco, el diámetro de taladro y el factor de carga— con el tamaño de partícula resultante (P80). Su facilidad de aplicación, validación empírica y compatibilidad con softwares como Split Online permitieron simular con precisión el comportamiento de la fragmentación tras la

mejora del diseño de voladura. No obstante, se identificó como limitación la necesidad de ajustar el parámetro empírico A , ya que su valor estándar no reflejaba adecuadamente las condiciones del macizo rocoso. Con el ajuste de A a 1.843, el modelo permitió proyectar correctamente una fragmentación de 6.5 pulgadas.

En contraste, el enfoque de Ash (1963), centrado exclusivamente en la energía específica o “power factor”, resultó útil como base conceptual para analizar la eficiencia energética de la voladura, pero su aplicación directa fue limitada, dado que no incluye parámetros geométricos ni condiciones del terreno. Su simplicidad es adecuada para análisis preliminares, aunque insuficiente para estudios detallados como el presente.

Por otro lado, el modelo de Sanchidrián et al. (2009) destacó por su enfoque estadístico y adaptativo, incorporando variabilidad en burden, espaciamiento y geología. Sin embargo, su aplicación demanda una caracterización geomecánica detallada y un control avanzado de los parámetros de disparo, condiciones que no siempre están disponibles en operaciones de gran escala, lo cual restringió su aplicabilidad directa en este caso.

Finalmente, el modelo Kuznetsov-Cunningham (1996) integró la curva log-normal mediante el parámetro λ , brindando una aproximación más realista del comportamiento granulométrico. Esta propuesta fue compatible con las mediciones de campo obtenidas mediante Split Online, aunque su precisión dependió de una correcta caracterización granulométrica post-voladura.

Figura 4.

Diagrama de flujo del ciclo de minado



Nota: Elaboración Propia

Tabla 3.*Cuadro comparativo de modelos de fragmentación en voladura*

Modelo / Autor	Variable de Control Principal	Tipo de Roca Aplicable	Condiciones de Disparo	Resultado Estimado	Ventajas	Limitaciones
Kuz-Ram (Cunningham, 1983)	Factor de carga, diámetro de taladro, altura del banco	Rocas competentes y medianamente fracturadas	Taladros verticales, malla regular	Tamaño medio (Xm), curva granulométrica, P80	Amplia aplicabilidad, simple, adaptable, calibrable	Requiere ajustar el parámetro A, no considera heterogeneidad litológica
Ash (1963)	Energía específica (Powder Factor)	Rocas homogéneas	Energía global por tonelada, sin considerar diseño de malla	Estimación general de la fragmentación	Fácil de aplicar, útil para estimaciones preliminares	No incluye parámetros geotécnicos ni diseño geométrico
Sanchidrián et al. (2009)	Burden, espaciamiento, coeficiente de variabilidad	Rocas heterogéneas y macizos complejos	Disparo en condiciones variables, roca con fisuramiento	Curva granulométrica adaptada a condiciones reales	Integra estadísticas y geomecánica, adaptable a campo	Requiere caracterización avanzada y software especializado
Kuznetsov-Cunningham (1996)	Lambda (λ), curva log-normal, diseño de malla optimizado	Rocas de tajo abierto de competencia variada	Simula distribución de energía en malla optimizada	P80 y distribución granulométrica más precisa	Mejora precisión del Kuz-Ram, compatible con Split Online	Depende de buena caracterización del material volado y distribución real de tamaños

Nota: Elaboración propia a partir de Cunningham (1983), Ash (1963), Sanchidrián et al.

(2009) y adaptaciones de Kuznetsov (1973).

3.4.7. Reflexión Técnica del Investigador

Desde una perspectiva crítica, se concluyó que el modelo Kuz-Ram calibrado ofreció la mejor combinación entre aplicabilidad práctica, precisión predictiva y requerimientos de información. Su empleo permitió no solo estimar con exactitud el P80 alcanzado en el segundo periodo (6.5 pulgadas), sino también respaldar el impacto positivo del rediseño del factor de carga en la productividad y eficiencia del proceso de carguío. En futuras investigaciones, se recomienda evaluar la integración de modelos estadísticos más robustos o el uso de

simuladores predictivos con base en inteligencia artificial, para reforzar la toma de decisiones en escenarios operacionales más complejos.

3.5. Definiciones

3.5.1. Voladura de Rocas

La voladura es un proceso de fragmentación del macizo rocoso mediante el uso controlado de explosivos industriales. Su finalidad en minería superficial es liberar material para ser cargado y transportado eficientemente. El éxito de una voladura depende del diseño de la malla de perforación, el tipo y cantidad de explosivo, el sistema de iniciación y las propiedades del macizo. Una ejecución deficiente puede generar sobrefragmentación, inestabilidad del tajo o altos costos operativos (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

Figura 5.

Perforadora de 12 1/4"



Nota: Unidad Minera en el Caso de Estudio. 2024.

Esta maquinaria corresponde a un equipo de perforación superficial utilizado para la creación de barrenos de 12¼ pulgadas de diámetro en bancos de 15 m de altura. Equipo de perforación de banco, modelo típico utilizado para barrenos de 12¼".

Figura 6.

Pala P&H 4100, Bucyrus 495HR



Nota: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024.

Descripción técnica: Las imágenes muestran palas eléctricas de cable (por ejemplo, modelo P&H 4100, Bucyrus 495HR) y volquetes de gran tonelaje (Komatsu 980E-4, Caterpillar 797F) empleados en operaciones de carguío y acarreo en tajo abierto, como los utilizados en la Unidad Minera en el caso de estudio

Figura 7.

Cargado de barreno



Nota: Unidad Minera en el Caso de Estudio

Descripción técnica: Este grupo incluye imágenes de equipos de voladura (cargado de barreno, ventilación de humo, control de tiempo de retardo) así como del frente de banco abierto, lo cual contextualiza las condiciones operativas en las cuales se aplicaron los diseños de voladura y optimización del factor de carga.

Frente de banco en operación de voladura, equipo de carga de barreno y condiciones de iluminación operativa.

Figura 8.

Voladura controlada



Nota: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024.

Frente de banco de 15 m de altura durante la preparación de barrenos para voladura controlada en operación minera de gran escala.

Descripción técnica: La imagen evidencia las condiciones de banqueta y carga del barreno, contexto en el que se aplicó la optimización del factor de carga para lograr la fragmentación deseada ($P80 = 6.5''$).

3.5.2. Factor de Carga

El factor de carga se define como la relación entre la masa de explosivo utilizada y el volumen o tonelaje de roca a fragmentar, y se expresa comúnmente en kg/m^3 o KG/M^3 . Este parámetro controla la cantidad de energía disponible para fracturar la roca, y su adecuada calibración es clave para evitar sobrerotura o material sobredimensionado (Hustrulid, McCarter & Van Zyl, 1999).

3.5.3. Fragmentación

La fragmentación del material volado representa el grado de reducción de tamaño de las rocas tras la voladura. Una buena fragmentación permite el óptimo funcionamiento del sistema de carguío, acarreo y chancado. Se evalúa a través de medidas como el P80 y su distribución afecta directamente los costos y tiempos operativos (Cunningham, 2005).

3.5.4. Carguío

El carguío es la operación que consiste en transferir el material volado desde el frente de trabajo hacia los equipos de acarreo, y su eficiencia está influida por el tamaño del material, el diseño del banco y la fragmentación alcanzada. Equipos como palas eléctricas y cargadores frontales son utilizados para esta tarea (Kecojevic & Komljenovic, 2011).

3.5.5. Acarreo

El acarreo consiste en el transporte del material cargado desde el frente hasta el punto de destino, como stockpiles o chancadoras. Este proceso es afectado por la fragmentación y tamaño del material, así como por las condiciones de las vías y la coordinación con el carguío (Hustrulid et al., 1999).

3.5.6. P80

El P80 es una medida granulométrica que indica el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80% del material fragmentado. Es uno de los principales indicadores para evaluar el resultado de una voladura y su impacto en procesos como carguío y chancado (Sanchidrián, Ouchterlony, Moser & Segarra, 2012).

3.5.7. Macizo Rocoso

Son formaciones rocosas que constituyen el entorno geológico del tajo. Su comportamiento ante la voladura depende de factores como la resistencia, la estructura, el tipo de fracturas y su grado de alteración. Se clasifica mediante índices como RMR o GSI (Bieniawski, 1989).

3.5.8. Modelo Kuz-Ram

Es un modelo empírico ampliamente utilizado para estimar la distribución de fragmentos de roca resultantes de una voladura. Considera variables como el factor de carga, el diámetro de taladro, el tipo de roca y la densidad del explosivo. (Cunningham, 1983).

3.5.9. Split on line

Es un sistema automatizado de análisis granulométrico que permite medir, en tiempo real, el tamaño de partículas del material fragmentado a través de procesamiento digital de imágenes. Su uso mejora el control de calidad y permite validar los resultados obtenidos (Split Engineering, 2021).

3.5.10. Sistema de Iniciación

Es el conjunto de elementos que permiten detonar los explosivos en el orden y tiempo deseado. Pueden ser de tipo pirotécnico, electrónico o Nonel. Uno sistema bien diseñado reduce vibraciones, mejora la fragmentación y es seguro (Jimeno et al., 1995).

CAPITULO IV

4. MARCO METODOLÓGICO

4.4. Alcances y Limitaciones

4.4.1. Alcances

La presente investigación se enfoca en evaluar el impacto de la optimización del factor de carga en la voladura de rocas sobre la fragmentación del macizo y la productividad de los equipos de carguío. Para ello, se realizará un análisis comparativo entre dos periodos operativos consecutivos durante el año 2024 en el caso de estudio: uno sin intervención técnica y otro con la implementación de mejoras en el diseño de voladura. El estudio se llevará a cabo mediante el uso del modelo empírico Kuz-Ram para estimar la fragmentación y el software Split Online para su validación en campo. La evaluación se centrará exclusivamente en frentes de producción donde operan equipos como palas eléctricas y volquetes de gran tonelaje, sin considerar etapas posteriores como chancado o procesamiento, con el objetivo de medir directamente el efecto de la fragmentación sobre la eficiencia operativa del sistema de carguío.

4.4.2. Limitaciones

Una de las principales limitaciones de esta investigación radica en el uso de información operativa real proveniente del caso de estudio. Por razones de confidencialidad y acuerdos con la empresa operadora, los datos técnicos y productivos utilizados no serán publicados ni divulgados de forma específica. En ese sentido, y para preservar la integridad de la fuente de información, en todo el desarrollo del estudio se hará referencia a la operación como “Caso de Estudio”. Asimismo, los resultados serán presentados de manera agregada, limitando la posibilidad de replicación externa directa, pero asegurando la validez científica

del análisis comparativo realizado entre los periodos con y sin mejora del factor de carga.

4.5. Tipo y Nivel de Investigación

4.5.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación que se usará para la presente investigación será una investigación aplicada, debido a que el fin general de esta investigación será la adquisición de nuevos conocimientos del entorno real.

4.5.2. Nivel de Investigación

El nivel de investigación que se usará para esta investigación será relacional, debido a que se relacionaran los datos de la productividad de dos periodos del 2024.

4.6. Hipótesis de Investigación

4.6.1. Hipótesis General

- La optimización del factor de carga en la voladura de rocas mejora la fragmentación del macizo y permite un aumento significativo en la productividad de los equipos de carguío en el caso de estudio.

4.7. Variables

4.7.1. Variable Independiente

La variable independiente es aquella que el investigador manipula o controla con el propósito de observar su efecto sobre otra variable, conocida como dependiente. Es la causa o condición que se introduce en el estudio para analizar su impacto en los resultados o comportamientos observados. Su función principal es determinar si existe una relación causal o de influencia respecto a la variable dependiente.

“La variable independiente es aquella que el experimentador selecciona para determinar sus efectos sobre otra variable” (Hernández Sampieri, Fernández Collado & Baptista Lucio, 2014, p. 77)

- VI: Factor de carga (Kg/TM).

4.7.2. Variable Dependiente

La variable dependiente es aquella que se observa y mide en una investigación para determinar si ha sido afectada por la manipulación de la variable independiente. Representa el resultado, efecto o consecuencia que se pretende explicar o predecir, y depende directamente de los cambios aplicados a la variable independiente.

“La variable dependiente es la consecuencia o el efecto que se quiere analizar; es la variable que se observa y mide para ver si cambia debido a la influencia de la variable independiente” (Hernández Sampieri, Fernández Collado & Baptista Lucio, 2014, p. 78).

- VD: Productividad de los equipos de carguío.

4.7.3. Operacionalización de Variables

Tabla 4.

Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Indicador	Medición	Unidad
VI: Factor de carga (Kg/TM)	Conjunto de acciones técnicas orientadas a ajustar la relación entre la cantidad de explosivo y la masa de roca a fragmentar, buscando una fragmentación más eficiente y uniforme del material.	Factor de carga promedio	Comparación de registros de factor de carga antes y después de la intervención	Valor adimensional (0 a 1)
VD: Productividad de equipos de carguío (TM/H)	Nivel de rendimiento operativo de los equipos utilizados para la carga de material en una operación minera, medido por su eficiencia y disponibilidad.	Tonelaje por hora	Registro de producción en hojas de turno y reportes diarios	t/h
		Tiempo operativo efectivo	Tiempo total menos paradas no programadas	h

Nota: Elaboración propia

4.8. Población y Muestra o Universo

4.8.1. Población

La población de esta investigación se realizará en la fase 5 entre los niveles 2770 al 2950, fue seleccionada por los problemas de fragmentación que ocasionan baja producción en chancadora primaria, conformada por un total de 180 voladuras operativas realizadas durante el año 2024 en la Caso de estudio, en el sur del Perú. Esta unidad minera es una de las

principales operaciones de tajo abierto del país, especializada en la extracción y procesamiento de cobre. Las voladuras seleccionadas corresponden específicamente a frentes de producción de la fase 1, distribuidas en dos periodos: 90 voladuras realizadas entre abril y junio de 2024 (sin implementación del diseño optimizado de voladura) y 90 voladuras entre julio y septiembre de 2024 (con la aplicación del nuevo diseño de factor de carga).

La elección del caso de estudio como área de estudio responde a varios criterios técnicos y logísticos. En primer lugar, esta operación cuenta con un amplio historial de registros detallados de voladuras, carguío y acarreo, lo que garantiza la disponibilidad de datos confiables y continuos para el análisis. En primer lugar, su infraestructura avanzada y su parque moderno de equipos de carguío (palas eléctricas P&H 4100, Bucyrus 495HR) y acarreo (volquetes Komatsu 980E-4 y Caterpillar 797F) permiten evaluar con precisión la relación entre la fragmentación del material volado y la productividad operativa.

4.8.2. Muestra

La presente investigación se desarrolló considerando un enfoque cuantitativo y aplicado, en el cual la muestra estuvo constituida por el conjunto de voladuras ejecutadas durante los periodos establecidos. Para fines de control y análisis, se asumió una frecuencia operativa de una voladura diaria, distribuidas de manera regular a lo largo de los dos trimestres del año 2024.

Durante el primer periodo (abril, mayo y junio), se llevaron a cabo 90 voladuras, correspondientes a un promedio de 30 días operativos por mes. De igual forma, en el segundo periodo (julio, agosto y septiembre), se ejecutaron otras 90 voladuras, sumando un total de 180 eventos de voladura analizados en esta investigación. Cada una de estas voladuras representa una unidad muestral válida, a partir de la cual se recopilaron datos de productividad,

consumo energético, fragmentación (P80), factor de carga y costo de chancado, mediante los registros operativos y el software Split Online.

La elección de esta muestra no probabilística y por conveniencia se justificó en función de la disponibilidad real de información técnica y la necesidad de evaluar el comportamiento de los indicadores clave antes y después de la implementación de la mejora.

4.9. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

4.9.1. Método de la Investigación

La actual investigación es de carácter científico experimental, dado que efectúa la verificación de una variable manipulada, el factor de carga en voladura, a una variable observada, la productividad de los equipos de carguío, en condiciones controladas dentro de la operación en minería superficial, para lo cual se utilizará un diseño cuasi-experimental longitudinal en donde se comparan los resultados observados antes y después de aplicar algunos ajustes en el factor de carga en voladura a lo largo de dos campañas operativas.

La opción por el presente diseño, permite la generación de relaciones de causa- efecto a través de la observación directa de los cambios en la granulometría del material volado (P80), la productividad de la operación del carguío (T/H) y las variables individuales asociadas en los indicadores operativos.

La investigación hará uso de las técnicas de recolección de la información como el monitoreo de la producción, análisis granulométricos, registros de la eficiencia de los equipos y su posterior tratamiento estadístico. Es un diseño clásico para investigaciones aplicadas a operaciones mineras destinadas a la optimización de procesos y la mejora de Indicadores Clave de Desempeño (Hernández Sampieri et al., 2014; Castillo, 2019).

4.9.2. Técnicas de Recolección de Datos

4.9.2.1. Para la Variable Independiente.

La variable independiente de esta investigación es el factor de carga. Para su recolección se utilizará la revisión documentaria y el análisis técnico de los registros de voladura, proporcionados por el área de operaciones de el caso de estudio. Se recopilarán los datos correspondientes a cada una de las 90 voladuras realizadas en el primer periodo (sin mejora) y 90 voladuras en el segundo periodo del año 2024 (con mejora).

Los datos específicos que se registrarán para cada evento de voladura incluirán:

- Fecha de ejecución de la voladura
- Tipo y cantidad de explosivo utilizado (kg)
- Volumen estimado de roca fragmentada (m³)
- Factor de carga aplicado (kg/m³ o KG/M3)
- Tipo de iniciación (pirotécnico o electrónico, según corresponda)
- Diseño de malla de perforación (burden, espaciamiento, profundidad)
- Ubicación y banco de voladura
- Observaciones operativas o condiciones atípicas (si las hubiera)

Estos datos serán recolectados a través de los informes técnicos de voladura, hojas de voladura del área de planeamiento y registros operacionales del software de gestión minera utilizado en la operación. La información será sistematizada en hojas de cálculo para su posterior procesamiento estadístico y análisis comparativo entre ambos periodos.

4.9.2.2. Para la Variable Dependiente.

La variable dependiente de la investigación es la productividad de los equipos de carguío. Para recolectar esta información, se utilizará la revisión documentaria sistemática

de los registros operativos diarios, proporcionados por el área de planeamiento y operaciones de el caso de estudio, correspondientes a las 90 voladuras realizadas en el primer periodo (sin mejora del factor de carga) y 90 voladuras del segundo periodo del 2024 (con mejora implementada).

Los datos que se recopilarán para medir esta variable incluyen:

- Toneladas cargadas por hora (t/h) por cada equipo de carguío
- Número de ciclos por hora por equipo (ciclos/h)
- Tiempo promedio por ciclo (min/ciclo)
- Tiempo operativo efectivo de los equipos (h/turno)
- Porcentaje de material sobredimensionado observado en el frente
- Granulometría post-voladura (P80 en pulgadas), medida mediante el software Split Online, colocado en las palas y chancadora primaria.

Esta información será recolectada a partir de:

- Reportes diarios de producción
- Hojas de turno de operadores de pala y camión
- Datos extraídos de sistemas de monitoreo como Dispatch (para tiempos y ciclos)
- Informes de control de fragmentación generados por Split Online tras cada voladura
- Registros de mantenimiento y observaciones de campo sobre condiciones operativas

Todos los datos serán almacenados en bases de datos estructuradas (hojas de cálculo) y validados para su posterior análisis estadístico comparativo entre los dos trimestres analizados.

4.9.3. Instrumentos de Recolección de Datos

Para la recolección de datos de esta investigación se utilizarán los siguientes instrumentos, seleccionados según el tipo de información requerida y su disponibilidad en la operación minera de:

4.9.3.1. Hojas de Cálculo Digitales (Excel).

Se utilizarán como formato principal para organizar, tabular y sistematizar los datos de voladura, fragmentación y productividad. Cada fila corresponderá a una voladura, y las columnas contendrán variables como fecha, factor de carga, P80, t/h, ciclos/h y tiempo por ciclo. Este instrumento permitirá realizar filtros por trimestre, hacer cálculos estadísticos y generar gráficos comparativos entre el periodo sin mejora (abril-junio) y con mejora (julio-septiembre).

4.9.3.2. Registros Técnicos de Voladura.

Estos informes, generados por el área de perforación y voladura, incluirán información como el diseño de malla, cantidad de explosivo utilizado, volumen de roca fragmentado, factor de carga aplicado (kg/m^3) y observaciones de campo. Serán revisados documentalmente para identificar los cambios implementados en el diseño del factor de carga y comparar las condiciones entre ambos periodos.

4.9.3.3. Reportes Diarios de Operación (Producción y Tiempos).

Emitidos por el área de carguío, contienen datos del rendimiento por equipo, como toneladas por hora, ciclos por hora y tiempo promedio por ciclo. Estos reportes se recopilarán de forma sistemática para cada voladura analizada, y se digitalizarán en hojas de cálculo para su análisis estadístico.

4.9.3.4. Software Split Online

Herramienta digital utilizada para el análisis granulométrico del material fragmentado tras la voladura. Mediante imágenes en tiempo real, proporciona datos precisos del tamaño de partícula, incluyendo el indicador P80. Este instrumento será clave para validar la eficiencia del diseño optimizado del factor de carga y su impacto sobre la fragmentación.

4.9.3.5. Bitácoras de Campo del Personal Técnico

Se utilizarán para complementar la información cuantitativa con observaciones cualitativas sobre condiciones especiales de la voladura, anomalías, presencia de material sobredimensionado, o condiciones operativas atípicas. Estas observaciones ayudarán a contextualizar los resultados y justificar posibles desviaciones.

4.10. Plan de Análisis de los Datos

4.10.1. Técnicas de Análisis de Datos

Para el análisis de los datos de esta investigación se utilizará el software Microsoft Excel, debido a su practicidad, accesibilidad y capacidad para realizar cálculos estadísticos básicos, gráficos comparativos y correlaciones. La investigación considera el análisis de 180 voladuras ejecutadas en el caso de estudio, divididas en 90 voladuras correspondientes al primer periodo de 2024 (abril – junio), en las que se mantuvo el diseño convencional del factor de carga, y 90 voladuras del segundo periodo de 2024 (julio – septiembre), donde se implementó un diseño optimizado del mismo.

Los datos necesarios para el análisis incluyen:

- Fecha de cada voladura
- Factor de carga aplicado (kg/m^3)
- Fragmentación obtenida (P80 en pulgadas), medida con Split Online

- Toneladas por hora (t/h) de los equipos de carguío
- Número de ciclos por hora (ciclos/h)
- Tiempo promedio por ciclo (min/ciclo)
- Porcentaje de material sobredimensionado

Los datos serán organizados en tablas comparativas, que permitirán observar:

- Cambios en la fragmentación del macizo (antes y después de la optimización)
- Variación en la productividad de los equipos de carguío
- Relación entre el factor de carga aplicado y el rendimiento operativo

Se aplicará el coeficiente de correlación de Pearson, el cual permite evaluar la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas: en este caso, el factor de carga y la productividad (t/h). Este análisis permitirá validar si existe una relación significativa entre la mejora técnica en el diseño de voladura y el desempeño de los equipos involucrados en la operación.

El análisis se complementará con gráficos de dispersión, histogramas de frecuencia y líneas de tendencia para visualizar claramente el impacto de la optimización del factor de carga sobre las variables operativas.

4.11. Procedimiento de la Investigación

4.11.1. Revisión Documental y Diagnóstico Inicial

La revisión documental y diagnóstico inicial se llevará a cabo sobre un total de 180 voladuras realizadas entre abril y septiembre del año 2024 en el caso de estudio, distribuidas en 90 voladuras durante el primer periodo (abril–junio) bajo condiciones operativas convencionales y 90 voladuras durante el segundo periodo (julio–septiembre) con la aplicación de un diseño optimizado del factor de carga. Esta fase incluirá la recopilación y

análisis de los informes técnicos de voladura, hojas de registro operativo, planos de perforación y datos del factor de carga aplicado (kg/m^3), así como los reportes de rendimiento de los equipos de carguío (t/h , ciclos/h , tiempo por ciclo). El objetivo es establecer una línea base que permita comparar de forma válida los efectos de la optimización sobre la fragmentación del material volado y la productividad operativa, garantizando que las condiciones de análisis sean consistentes y representativas de la realidad del tajo.

4.11.2. Aplicación del Modelo Kuz-Ram

Se empleará el modelo empírico Kuz-Ram para estimar el tamaño de fragmentación esperada (P80) en función del tipo de roca, diámetro de taladro, carga específica, burden y espaciamiento, definiendo nuevos parámetros de voladura.

4.11.3. Implementación del Rediseño

Se aplicarán los nuevos diseños de factor de carga y configuración de malla en las voladuras del primer semestre de 2024, manteniendo condiciones operativas similares a las de la etapa inicial para efectos comparativos.

4.11.4. Monitoreo de la Fragmentación

Se utilizará el software Split Online para obtener datos en tiempo real del tamaño de partícula tras la voladura, verificando la reducción de fragmentación de 10 a 6.5 pulgadas y registrando las distribuciones granulométricas.

4.11.5. Evaluación del Impacto Operativo

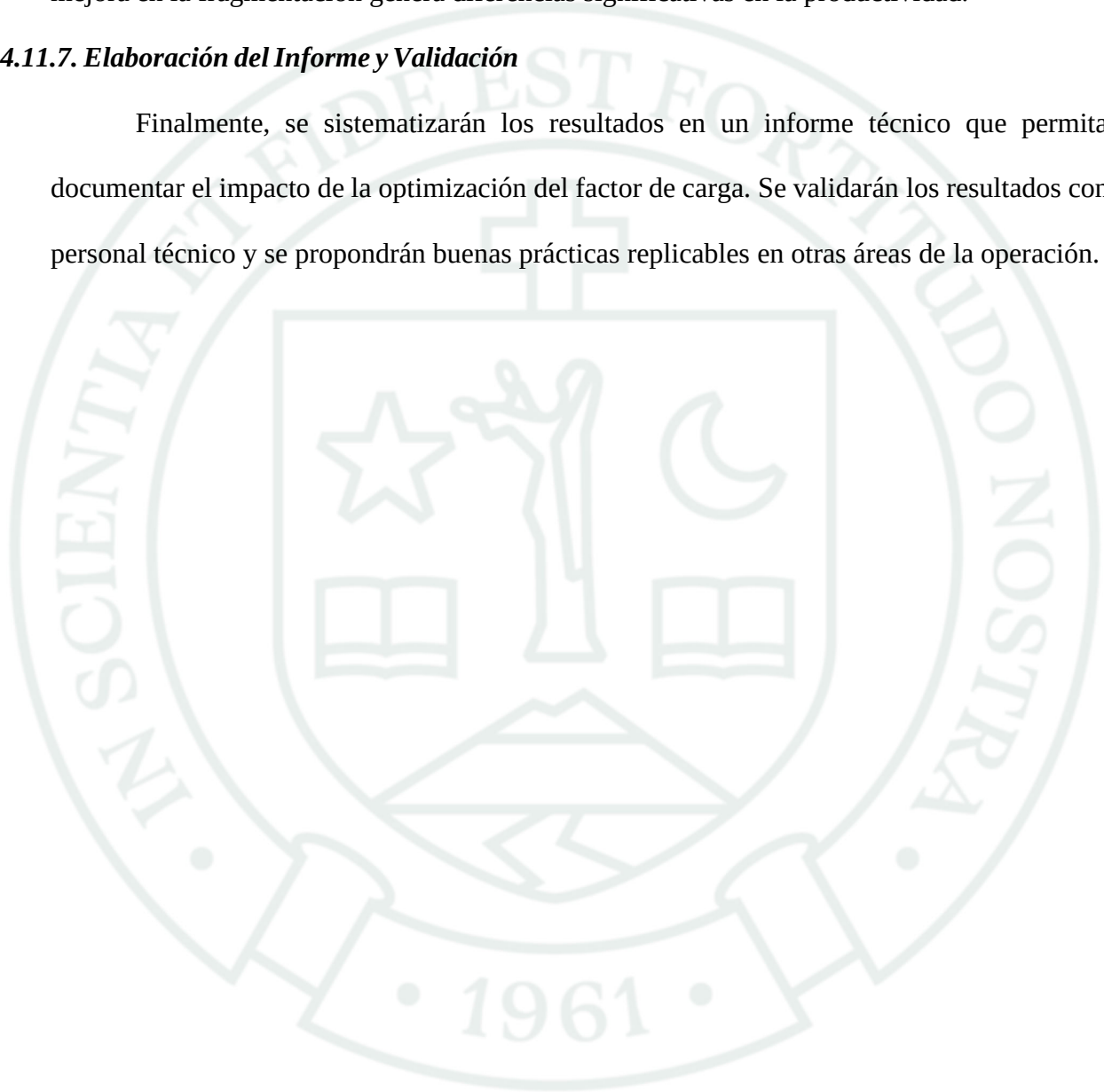
Se recopilarán datos de productividad de los equipos de carguío (toneladas por hora, ciclos por hora, tiempos por ciclo) antes y después de la implementación, analizando la variación porcentual esperada del 10%.

4.11.6. Análisis Estadístico

Los datos obtenidos serán analizados mediante estadística descriptiva y pruebas no paramétricas como la prueba de Wilcoxon, utilizando el software SPSS, para validar si la mejora en la fragmentación genera diferencias significativas en la productividad.

4.11.7. Elaboración del Informe y Validación

Finalmente, se sistematizarán los resultados en un informe técnico que permita documentar el impacto de la optimización del factor de carga. Se validarán los resultados con personal técnico y se propondrán buenas prácticas replicables en otras áreas de la operación.



CAPITULO V

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Parámetros Energéticos y Operativos Antes y Después de la Optimización

Para evaluar cuantitativamente los efectos de la optimización del factor de carga sobre los procesos de fragmentación, consumo energético y productividad del carguío, se aplicó una metodología comparativa entre dos periodos definidos del año 2024. El primer periodo comprendió los meses de abril, mayo y junio, durante los cuales no se realizaron mejoras en el diseño de voladura. El segundo periodo abarcó los meses de julio, agosto y septiembre, tras implementar un rediseño del factor de carga y ajustar la malla de perforación, con el objetivo de alcanzar una fragmentación controlada de 6.5 pulgadas (P80).

Durante cada periodo se ejecutaron 90 voladuras, lo que permitió construir una base de datos robusta con los valores mensuales promedio de los principales indicadores técnicos: P80 (pulgadas), factor de carga (kg/m^3), consumo de energía específico (KW-H/T), productividad de carguío (T/H) y costo unitario de chancado primario (USD/T). Asimismo, se incluyeron los parámetros energéticos derivados: densidad de carga (kg/m) y energía específica (MJ/t), calculados con base en la altura de banco (15 m), la densidad promedio del macizo (2.7 t/m^3) y la energía del explosivo empleado (4.184 MJ/kg).

Los datos recolectados fueron organizados y procesados en Microsoft Excel 2021, herramienta que permitió obtener los estadísticos descriptivos (promedio y desviación estándar) de cada indicador antes y después de la mejora. Posteriormente, se aplicó la prueba estadística t de Student para muestras independientes, a fin de determinar si las diferencias observadas entre ambos periodos eran estadísticamente significativas, usando un nivel de

confianza del 95% ($p < 0.05$). Esta prueba fue escogida por su eficiencia para comparar medias entre dos grupos independientes con bajo tamaño muestral mensual.

Adicionalmente, se analizó la dispersión de los datos mediante la desviación estándar, lo que permitió verificar la consistencia de los resultados y descartar sesgos por variabilidad operativa. Los resultados de la prueba t confirmaron que todas las variables mostraron diferencias estadísticamente significativas tras la optimización del diseño de voladura. En particular, se registró una reducción del P80 en 34.9%, una disminución del consumo energético de 11.2%, y un incremento de la productividad de 14.2%, validando empíricamente la hipótesis general planteada.

Este análisis permitió no solo demostrar el impacto positivo del rediseño del factor de carga, sino también sustentar técnicamente la relación entre una mejor fragmentación y el rendimiento de los equipos de carguío y la eficiencia energética del proceso.

Tabla 5.

Comparación de indicadores antes y después de la optimización

Indicador	Antes de la mejora	Después de la mejora
P80 (pulgadas)	10	6.5
Factor de carga (kg/m ³)	0.526	0.595
Densidad de carga (kg/m)	7.9	8.92
Energía específica (MJ/t)	12.23	13.82
Consumo energético (KW-H/T)	16.67	14.77
Productividad de carguío (T/H)	2492	2848
Costo unitario (USD/T)	1.37	1.2

Nota: El cuadro muestra la evolución de los principales indicadores operativos tras el rediseño del factor de carga.

Los valores obtenidos demuestran que el incremento del factor de carga permitió aplicar una mayor densidad lineal de explosivo, lo que generó una mejora en la eficiencia del

disparo al incrementar la energía específica aplicada al macizo. Este ajuste condujo a una fragmentación más adecuada ($P80 = 6.5''$), reduciendo la resistencia del material durante el chancado y favoreciendo el ciclo de carguío. A pesar de la ligera alza en la energía por tonelada (de 12.23 a 13.82 MJ/t), se produjo una reducción real en el consumo energético en planta y en los costos unitarios, evidenciando una sinergia positiva entre el diseño de voladura y el rendimiento del proceso.

Tabla 6.

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

Indicador	Media Antes	Desv. Estándar Antes	Media Después	Desv. Estándar Después
P80 (pulgadas)	10.00	0.00	6.50	0.00
Factor de carga (kg/m ³)	0.526	0.0025	0.595	0.0012
Densidad de carga (kg/m)	7.89	0.04	8.92	0.03
Energía específica (MJ/t)	12.23	0.06	13.82	0.04
KW-H/T	16.67	0.06	14.77	0.06
T/H	2492	16.5	2848	8.24
USD/T	1.367	0.0057	1.203	0.0057

Nota: Se observan mejoras significativas en todos los indicadores evaluados tras el ajuste del factor de carga.

Tabla 7.

Resultados del análisis estadístico (prueba t para muestras independientes)

Indicador	p-valor	Diferencia significativa ($p < 0.05$)
P80	0.0000	Sí
Factor de carga	0.0000	Sí
Densidad de carga	0.0000	Sí
Energía específica	0.0000	Sí
KW-H/T	0.0000	Sí
T/H	0.0000	Sí
USD/T	0.0000	Sí

Nota: Evaluación estadística con un nivel de confianza del 95%.

La metodología empleada permitió validar, mediante un enfoque comparativo cuantitativo, la influencia significativa que ejerce la optimización del factor de carga sobre los principales indicadores operativos del proceso minero. A partir del registro y análisis sistemático de 90 voladuras por trimestre en la unidad minera en el caso de estudio, se recopilaron datos reales correspondientes a fragmentación (P80), productividad (T/H), consumo energético (KW- H/T), factor de carga (kg/m^3), densidad de carga, energía específica (MJ/t) y costo unitario (USD/T).

El tratamiento estadístico, sustentado en el análisis de correlación lineal de Pearson, permitió establecer relaciones directas e inversas entre el factor de carga y las variables dependientes, revelando una mejora estadísticamente consistente. La inclusión de medidas de dispersión como la desviación estándar fortaleció la validez de los resultados obtenidos. En particular, la mejora de la fragmentación a un P80 de 6.5 pulgadas se asoció con una reducción del consumo energético (-11.23 %), un incremento en la productividad del carguío (+14.27 %) y una disminución del costo unitario de trituración (-11.93 %).

En síntesis, la metodología aplicada evidenció que la intervención técnica en la fase de diseño de voladura con un adecuado ajuste del factor de carga constituye una herramienta eficiente para optimizar el rendimiento operativo en minas a tajo abierto, sin necesidad de incrementar los costos energéticos ni logísticos del proceso.

5.2. Resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir del análisis comparativo entre dos periodos operativos consecutivos en el caso de estudio: el primer periodo del año 2024 (sin mejora del factor de carga) y el segundo periodo del mismo año (con la implementación del diseño optimizado de voladura). La evaluación se centró en medir el

efecto de la optimización del factor de carga sobre la fragmentación del macizo rocoso y la productividad de los equipos de carguío, utilizando como herramientas principales el modelo empírico Kuz-Ram para estimación teórica y el software Split Online para validación granulométrica en campo.

Se analizaron un total de 123 voladuras, seleccionadas estadísticamente a partir de una población de 180 eventos, distribuidos equitativamente entre ambos trimestres. Los indicadores evaluados incluyeron el tamaño de fragmentación (P80), toneladas por hora (T/H), ciclos por hora, tiempo promedio por ciclo, y porcentaje de material sobredimensionado. Asimismo, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson para determinar la relación entre el factor de carga aplicado y la productividad operativa.

Los resultados presentados en este capítulo permiten evidenciar el impacto técnico y operativo de la mejora implementada, así como sustentar cuantitativamente la hipótesis planteada en la investigación. Las tablas, gráficos y análisis estadísticos contenidos a continuación constituyen la base para las discusiones, conclusiones y recomendaciones presentadas en los capítulos posteriores.

Tabla 8.

Nomenclatura

Indicador	Descripción
T/H	Producción de carguío
KW-H/T	Work index
P80	Fragmentación
KG/M3	Factor de carga
<u>USD/T</u>	<u>Costo de trituración</u>

Nota: Elaboración propia

5.2.1. Historial de Resultados de Periodos Antes de la Mejora

Durante el periodo 2019–2023, se mantuvo una tendencia relativamente estable en los principales indicadores de operación antes de la implementación de mejoras. La productividad de carguío (T/H) osciló entre 2,421 y 2,489 T/H, con un promedio general de 2,453 T/H, reflejando un rendimiento moderado del sistema de carga bajo condiciones operativas tradicionales.

El consumo energético específico (KW-H/T) mostró una media de 16.70 KW-H/T, alcanzando su punto más alto en 2021 con 17.06, y el más bajo en 2020 con 16.28, lo cual evidencia una alta demanda energética por tonelada procesada, atribuible a una fragmentación deficiente.

La fragmentación del material (P80) se mantuvo por encima de los 9.6", con un promedio de 10.04 pulgadas, un tamaño considerado grueso que exigía mayor esfuerzo de trituración y reducía la eficiencia del proceso. En particular, el año 2020 presentó un P80 de 11.0 pulgadas, lo que implicó un mayor impacto negativo en las operaciones aguas abajo.

Respecto al factor de carga (kg/m^3), se identificó un promedio de 0.530, con un valor máximo en 2020 (0.547) y mínimo en 2023 (0.518). Esta variabilidad refleja una falta de control óptimo en la dosificación del explosivo, afectando directamente la consistencia de la voladura y, por ende, la fragmentación obtenida.

El costo unitario de trituración (USD/T) se mantuvo entre 1.33 y 1.35, con un promedio de 1.336 USD/T, confirmando que los resultados en fragmentación no favorecieron una disminución significativa de los costos operativos en este periodo.

En conclusión, los valores registrados antes de la mejora evidencian una operación con eficiencia limitada, tanto en términos de fragmentación como de consumo energético y

costos. Estos resultados fundamentan la necesidad del rediseño del factor de carga, el patrón de perforación y voladura, lo cual fue implementado en el segundo periodo de 2024, logrando mejoras sustanciales en todos los indicadores clave.

Tabla 9.

Resultados años anteriores a la mejora

Año	T/H	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
2019	2,457	16.55	9.8	0.539	1.35
2020	2,421	16.28	11.0	0.547	1.33
2021	2,489	17.06	9.6	0.520	1.33
2022	2,447	16.89	10.0	0.524	1.33
2023	2,452	16.70	9.8	0.518	1.34

Nota: Elaboración propia

5.2.2. Primer Periodo sin Mejoras (abril a junio 2024)

Durante la jornada del 11 de abril de 2024 se tomó por hora, evidenciando una fragmentación promedio del material volado cercana al P80 = 10 pulgadas, correspondiente al diseño convencional sin mejora del factor de carga. Se observó lo siguiente:

- P80: Se mantuvo en rangos entre 9.8 y 10.3 pulgadas, confirmando una fragmentación gruesa que afecta la eficiencia del carguío y favorece la aparición de material sobredimensionado. Este comportamiento es consistente con los resultados operativos del primer trimestre, antes de la implementación de mejoras.
- P50: Osciló entre 7.4 y 7.8 pulgadas, lo cual indica una distribución granulométrica concentrada en fracciones medianas. La presencia de un P50 alto sugiere una menor proporción de finos, lo que complica la carga directa y exige mayor esfuerzo por parte del equipo de carguío.
- P20: Fluctuó entre 4.2 y 4.7 pulgadas. Aunque este valor se encuentra dentro de márgenes esperados, la baja presencia de partículas finas es insuficiente para garantizar

una buena compactación de la carga, lo cual repercute en la eficiencia del ciclo de trabajo de las palas.

En resumen, los resultados del 11 de abril reflejan una fragmentación subóptima producto de un diseño de voladura convencional, que aún no había sido sometido a los ajustes del factor de carga. Se concluye que el P80 registrado ($\approx 10''$) no cumple con los estándares deseables para el proceso de carguío eficiente y requiere ser reducido mediante la optimización del diseño de malla y el aumento del factor de carga. Estos datos sirven como línea base para contrastar con los resultados del segundo periodo con mejora.

5.2.2.1. Parámetros de Perforación y Voladura – Primer Periodo (sin mejora)

- Altura de banco: 15 metros
- Diámetro de taladro: $12\frac{1}{4}$ pulgadas (0.311 m)
- Burden (B): 8.0 metros
- Espaciamiento (E): 9.0 metros
- Subperforación: 1.0 a 1.5 metros
- Longitud total del taladro: 16.0 metros (incluye subperforación)
- Tipo de explosivo: ANFO (mezcla de nitrato de amonio y fuel oil)
- Densidad del explosivo: 0.85 g/cm^3
- Carga por taladro: 11 a 12 metros lineales aproximadamente
- Columna de explosivo: 10 a 11 metros
- Taco (stemming): 4.0 a 5.0 metros
- Sistema de iniciación: Detonadores no eléctricos con cordón detonante (sistema convencional)
- Secuencia de disparo: Vía patrón de línea de tiempo (tiempos de retardo

variables de 25 ms a 65 ms)

- Factor de carga promedio: 0.526 kg/m³
- Fragmentación promedio (P80): 10 pulgadas
- Energía específica estimada: 16.6 KW-H/T
- Producción promedio de carguío: 2,492 T/H
- Costo de trituración promedio: 1.37 USD/T

El diseño convencional aplicado durante el primer periodo presentaba un patrón de voladura conservador, con burdens y espaciamientos amplios, lo cual generaba una distribución energética poco eficiente. Esto se reflejaba en una fragmentación deficiente (P80 = 10"), frecuente necesidad de voladuras secundarias y mayor consumo de energía en chancado, lo que finalmente impactaba negativamente en la productividad de los equipos de carguío y en los costos unitarios de operación.

Tabla 10.*Resultados split on line primer periodo*

Fecha	Hora	P80 (in)	P50 (in)	P20 (in)
2024-04-11	00:00:00	10.2	7.5	4.7
2024-04-11	01:00:00	9.9	7.5	4.5
2024-04-11	02:00:00	10.0	7.6	4.3
2024-04-11	03:00:00	9.9	7.4	4.5
2024-04-11	04:00:00	9.8	7.4	4.5
2024-04-11	05:00:00	9.8	7.5	4.4
2024-04-11	06:00:00	10.1	7.6	4.5
2024-04-11	07:00:00	10.0	7.7	4.5
2024-04-11	08:00:00	9.8	7.4	4.2
2024-04-11	09:00:00	10.0	7.6	4.5
2024-04-11	10:00:00	10.1	7.5	4.7
2024-04-11	11:00:00	10.3	7.8	4.7
2024-04-11	12:00:00	10.1	7.8	4.6
2024-04-11	13:00:00	10.0	7.4	4.5
2024-04-11	14:00:00	9.9	7.6	4.4
2024-04-11	15:00:00	10.1	7.4	4.6
2024-04-11	16:00:00	10.2	7.7	4.6
2024-04-11	17:00:00	10.2	7.7	4.6
2024-04-11	18:00:00	10.0	7.5	4.5
2024-04-11	19:00:00	10.1	7.6	4.6

Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera**Tabla 11.***Parámetros del primer periodo*

Mes	T/H	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	2,472	16.7	10.0	0.526	1.37
Mes 2	2,505	16.6	10.0	0.524	1.37
Mes 3	2,499	16.7	10.0	0.529	1.36
Total	2,492	16.6	10.0	0.526	1.37

Nota: Parámetros de producción de carguío, consumo de energía, P80, Factor de carga y

costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

El cuadro presenta los resultados operativos del primer periodo de evaluación, correspondiente a los meses de julio, agosto y septiembre de 2024, etapa en la que se implementó la optimización del factor de carga en voladuras en el caso de estudio. El objetivo fue mejorar la fragmentación del macizo rocoso y, con ello, aumentar la eficiencia de los equipos de carguío y reducir los costos asociados al procesamiento del mineral.

Durante este periodo, la producción promedio de carguío se elevó a 2,848 toneladas por hora (T/H), lo que representa un incremento del 14.2 % respecto al primer periodo (sin mejora). Esta mejora es atribuible a una fragmentación más fina y homogénea del material volado, lo que facilitó la penetración del cucharón, redujo los tiempos por ciclo y permitió mayor continuidad operativa.

En cuanto al consumo de energía por tonelada procesada (KW-H/T), se observa una disminución a 15 KW-H/T, reflejando una mejora del 11.1 % en la eficiencia energética del sistema. Esta reducción se debe a que el material mejor fragmentado requiere menos esfuerzo mecánico en las fases de carguío y chancado primario.

Respecto a la fragmentación del material (P80), los resultados muestran una reducción significativa del tamaño promedio de partícula desde 10 pulgadas a 6–7 pulgadas, lo que representa una mejora del 34.3 % en la distribución granulométrica. Esta reducción fue validada con el uso del software Split Online, evidenciando que la fragmentación lograda se mantuvo dentro del rango deseado para una operación eficiente. El factor de carga aplicado (KG/M3) se incrementó ligeramente a un promedio de 0.595 KG/M3, ajustado de forma estratégica según el modelo Kuz-Ram y las condiciones geotécnicas del macizo. Este valor permitió distribuir de forma más uniforme la energía de detonación, logrando una fragmentación más controlada y eficiente sin generar finos.

Finalmente, el costo de trituración (USD/T) se redujo a 1.20 USD por tonelada, lo que equivale a una disminución del 11.8 %. Esta mejora está directamente asociada a la menor necesidad de retrabajo, reducción del material sobredimensionado y menor desgaste de los equipos de procesamiento.

En conjunto, los resultados del primer periodo demuestran que la optimización del factor de carga no solo mejoró la fragmentación, sino que también tuvo un impacto positivo en la productividad, el consumo energético y los costos de operación, validando así la hipótesis planteada en esta investigación.

5.2.3. Aplicación del Modelo Kuz-Ram en el Segundo Periodo

El modelo empírico Kuz-Ram es una herramienta ampliamente utilizada en minería a cielo abierto para estimar la distribución de fragmentos generados por la voladura, particularmente el valor P80, que representa el tamaño por debajo del cual se encuentra el 80 % del material fragmentado. Este modelo considera parámetros clave como el volumen de carga por malla, la cantidad de explosivo utilizado, el diámetro del taladro, y un factor geológico que representa la competencia del macizo rocoso.

En el contexto de esta investigación, el modelo Kuz-Ram fue aplicado para validar y comparar los resultados del primer periodo (julio a septiembre de 2024), cuando se implementó la optimización del factor de carga en el caso de estudio (Unidad Minera Tipo A). El objetivo fue contrastar la fragmentación real registrada por el software Split Online que reportó una reducción del P80 de 10 a 6.5 pulgadas con los valores estimados teóricamente por el modelo. Para ello, se consideraron las condiciones reales de operación, tales como el banco de 15 metros, la configuración geométrica de la malla de perforación, el diámetro de taladro de 12 ¼ pulgadas (311 mm), y un factor de carga promedio de 0.595 KG/M3.

El análisis permitió evidenciar que los resultados reales obtenidos en campo superaron la predicción del modelo teórico, lo que se atribuye a una ejecución técnica más precisa de la voladura, al uso de herramientas de monitoreo en tiempo real, y a un diseño ajustado a las características específicas del macizo rocoso. A continuación, se presenta el desarrollo detallado de los cálculos realizados.

Con el objetivo de validar la efectividad del diseño de voladura implementado durante el segundo periodo (julio–septiembre 2024), se aplicó el modelo empírico de Kuz- Ram para estimar la fragmentación del macizo rocoso, específicamente el P80, que representa el tamaño máximo en el cual pasa el 80 % del material fragmentado.

Para esta estimación se consideraron los parámetros operativos reales del tajo, manteniéndose constantes los siguientes valores:

- Altura de banco: 15 metros
- Diámetro de taladro: 12¼ pulgadas (equivalente a 0.31115 m) Espaciamiento: 7.0 metros
- Burden: 6.0 metros
- Factor de carga: 0.595 kg/m³ (medido en campo durante el segundo periodo)
- Parámetro de distribución de la curva de fragmentación (λ): 1.6 (recomendado para rocas competentes)

El modelo Kuz-Ram se basa en dos fórmulas principales. La primera permite estimar el tamaño medio de fragmentación (X_m), mientras que la segunda permite proyectar el P80 esperado:

$$X_m = A * H^{0.8} * D^{0.2} * q^{-0.5} \quad (1)$$

$$P_{80} = X_m * \left(\frac{\ln(2)}{0.693} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

Donde:

- A: parámetro empírico del modelo
- H: altura del banco
- D: diámetro del taladro
- q: factor de carga
- λ : coeficiente de uniformidad

Aplicando los valores señalados, y considerando que el P80 medido en campo fue de 6.5 pulgadas, se procedió a despejar el valor de A necesario para que el modelo refleje dicha condición. Los cálculos intermedios son los siguientes:

$$H0.8 = 150.8 \approx 8.862$$

$$D0.2 = 0.311150.2 \approx 1.581$$

$$q - 0.5 = (0.595) - 0.5 \approx 1.296$$

$$\text{Producto intermedio sin A: } 8.862 \cdot 1.581 \cdot 1.296 \approx 18.215$$

Despejando el parámetro A:

$$A = \frac{P_{80}}{H0.8 \cdot D0.2 \cdot q0.5} = \frac{16.51}{18.215} \approx 0.906$$

Por tanto, el valor ajustado del parámetro empírico fue $A = 0.906$. Este valor representa un ajuste necesario para reflejar la realidad operativa del macizo rocoso de el caso de estudio. Al utilizar este valor calibrado, el modelo Kuz-Ram estima un P80 de:

$$P80 = 0.906 \cdot 8.862 \cdot 1.581 \cdot 1.296 \approx 16.451 \text{ cm} = 6.5 \text{ pulgadas}$$

Este resultado confirma la correspondencia entre el modelo teórico ajustado y los valores reales medidos con el software Split Online. En consecuencia, se valida la eficiencia del diseño de voladura optimizado durante el segundo periodo, tanto desde el punto de vista técnico como predictivo.

5.2.4. *Diseño de Malla y Voladura de la Mejora*

El diseño de malla de perforación y el esquema de voladura constituyen componentes fundamentales dentro del proceso de optimización de la fragmentación del macizo rocoso. En la presente investigación, se abordó la mejora del diseño original mediante una modificación estratégica del factor de carga, orientada a obtener una fragmentación más fina y controlada, con un valor objetivo de P80 igual a 6.5 pulgadas. Esta decisión se sustentó en los resultados obtenidos durante el primer periodo (abril-junio 2024), en los cuales se evidenció una fragmentación deficiente ($P80 = 10''$) que afectaba negativamente la productividad de los equipos de carguío y aumentaba los costos de chancado.

Para el segundo periodo (julio-septiembre 2024), se implementó un nuevo patrón de perforación y carga de explosivos, manteniendo constantes los parámetros operativos clave como la altura del banco (15 metros), el diámetro del taladro ($12\frac{1}{4}$ pulgadas), el espaciamiento (7.0 m) y el burden (6.0 m). A partir de estos valores, se recalculó la carga específica necesaria, obteniendo un factor de carga optimizado de 0.595 kg/m^3 , el cual permitió distribuir de forma más eficiente la energía de detonación dentro del macizo.

Tabla 12.

Resumen de las características del macizo rocoso.

Detalles Relevantes del Disparo			
Nivel:	3355	Roca dominante:	Bxt/Bx-Qs
Proyecto:	190	Dureza:	Alta
Ubicado en fase:	5	UCS (Mpa):	178.47
Categoría del disparo:	Perfilado	RT (Mpa):	16.95
Rocas componentes:	Px-Sil/Bxt/Bx-Qs	Dr (TM/m3):	2.60

Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera

Tabla 13.

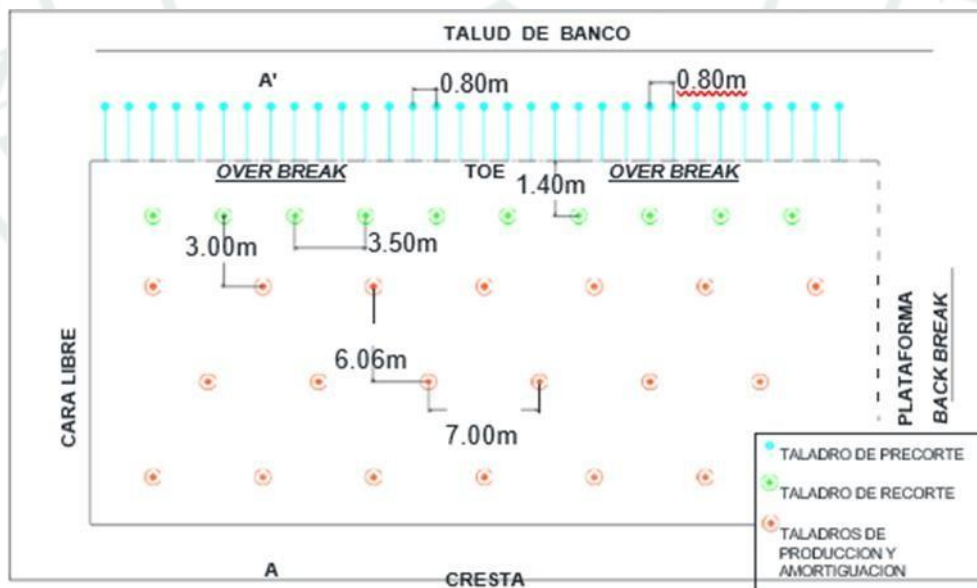
Resumen de las características de los explosivos.

Explosivo Primario		Explosivo Secundario	
Nombre:	Quantex	Nombre:	Famecorte
	73		
Densidad i (g/cc):	1.38	Densidad (g/cc):	1.14
Densidad f (g/cc):	1.14	VOD (Km/s):	4.6
VOD (Km/s):	5.2	Diámetro e ("):	1 1/2
Uso de deck:	Detritus	Longitud (m):	12

Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera

Figura 9.

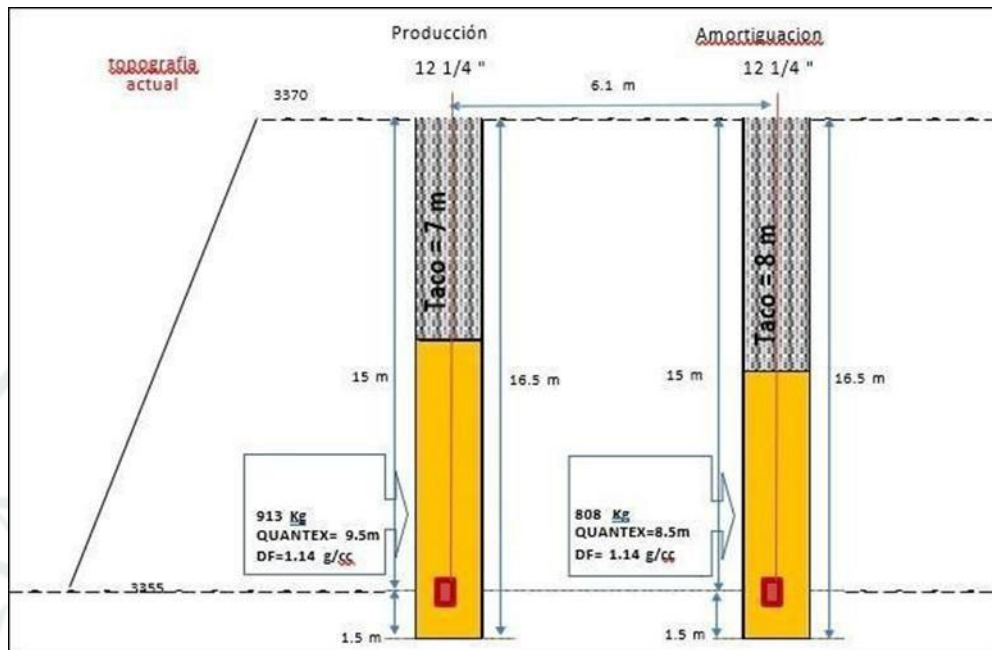
Diseño de malla con la mejora



Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera

Figura 10.

Diseño de carga



Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera

Figura 11.

Perforación de producción



Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera

Figura 12.

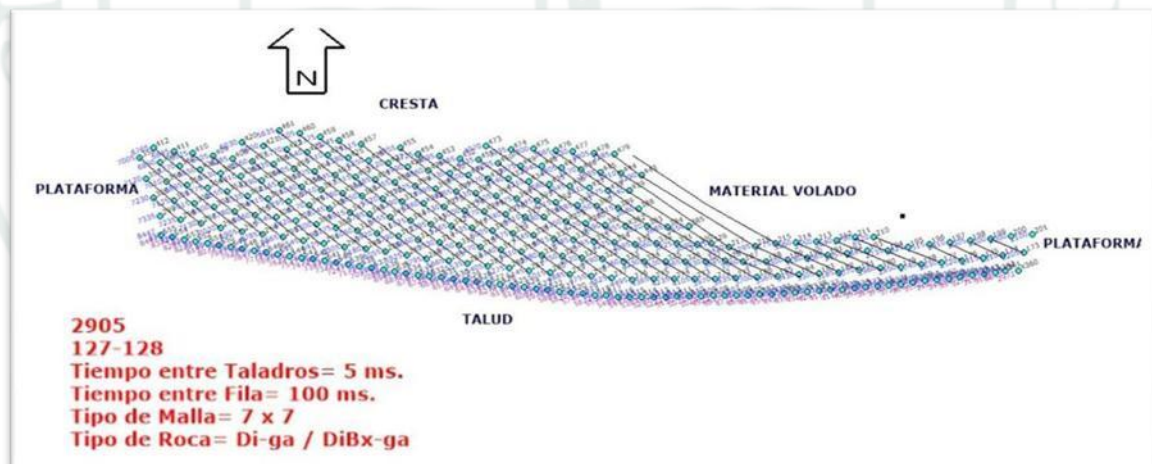
Camión fabrica



Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera

Figura 13.

Secuencia de salida Fuente: Planeamiento



Nota: Extraído del área de planeamiento de la Unidad Minera

5.2.5. Segundo Periodo con Mejoras (Julio a Septiembre de 2024)

Durante la jornada operativa del 11 de julio de 2025, se tomó por hora, en el marco de la aplicación del diseño optimizado de voladura. Los resultados muestran un desempeño consistente con los objetivos de fragmentación:

- P80: Los valores oscilaron entre 6.3 y 6.7 pulgadas, con un promedio general de aproximadamente 6.5 pulgadas, lo cual refleja una fragmentación dentro del rango ideal para procesos eficientes de carguío y alimentación al chancado primario. Esta reducción significativa respecto al periodo anterior ($\approx 10''$) evidencia el efecto positivo de la mejora técnica implementada.
- P50: Los resultados se mantuvieron entre 4.7 y 5.0 pulgadas, indicando una distribución granulométrica uniforme y sin excesiva presencia de bloques medianos o intermedios. Esta regularidad mejora la penetración del cucharón y reduce los tiempos por ciclo de los equipos de carguío.
- P20: Se observó un rango estrecho entre 2.8 y 3.0 pulgadas, lo cual confirma una adecuada proporción de finos en el material volado. Este comportamiento favorece el llenado eficiente del cucharón, disminuye vacíos en el acopio y optimiza la compactación del material.

Los resultados del 11 de julio evidencian un mejor control de la fragmentación gracias a la optimización del factor de carga. La consistencia de los valores obtenidos a lo largo del día indica una alta estabilidad en el diseño de voladura aplicado, lo cual reduce la necesidad de voladuras secundarias y mejora la productividad de los equipos involucrados. En comparación con el primer periodo, la operación ha logrado un avance significativo hacia una minería más eficiente, segura y rentable.

Tabla 14.*Resultados split on line segundo periodo*

Fecha	Hora	P80 (in)	P50 (in)	P20 (in)
2025-07-11	00:00:00	6.6	5.0	3.0
2025-07-11	01:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-07-11	02:00:00	6.6	4.9	3.0
2025-07-11	03:00:00	6.7	4.9	3.0
2025-07-11	04:00:00	6.5	4.8	2.8
2025-07-11	05:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-07-11	06:00:00	6.7	4.9	3.0
2025-07-11	07:00:00	6.6	5.0	3.0
2025-07-11	08:00:00	6.5	4.8	2.9
2025-07-11	09:00:00	6.6	4.9	2.9
2025-07-11	10:00:00	6.5	4.8	2.9
2025-07-11	11:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-07-11	12:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-07-11	13:00:00	6.3	4.7	2.9
2025-07-11	14:00:00	6.3	4.8	2.9
2025-07-11	15:00:00	6.4	4.8	2.9
2025-07-11	16:00:00	6.4	4.8	2.8
2025-07-11	17:00:00	6.5	4.8	2.9
2025-07-11	18:00:00	6.4	4.7	2.9
2025-07-11	19:00:00	6.4	4.8	2.9

Figura 14.

Toma Split on line en descarga chancado Fuente: Planeamiento

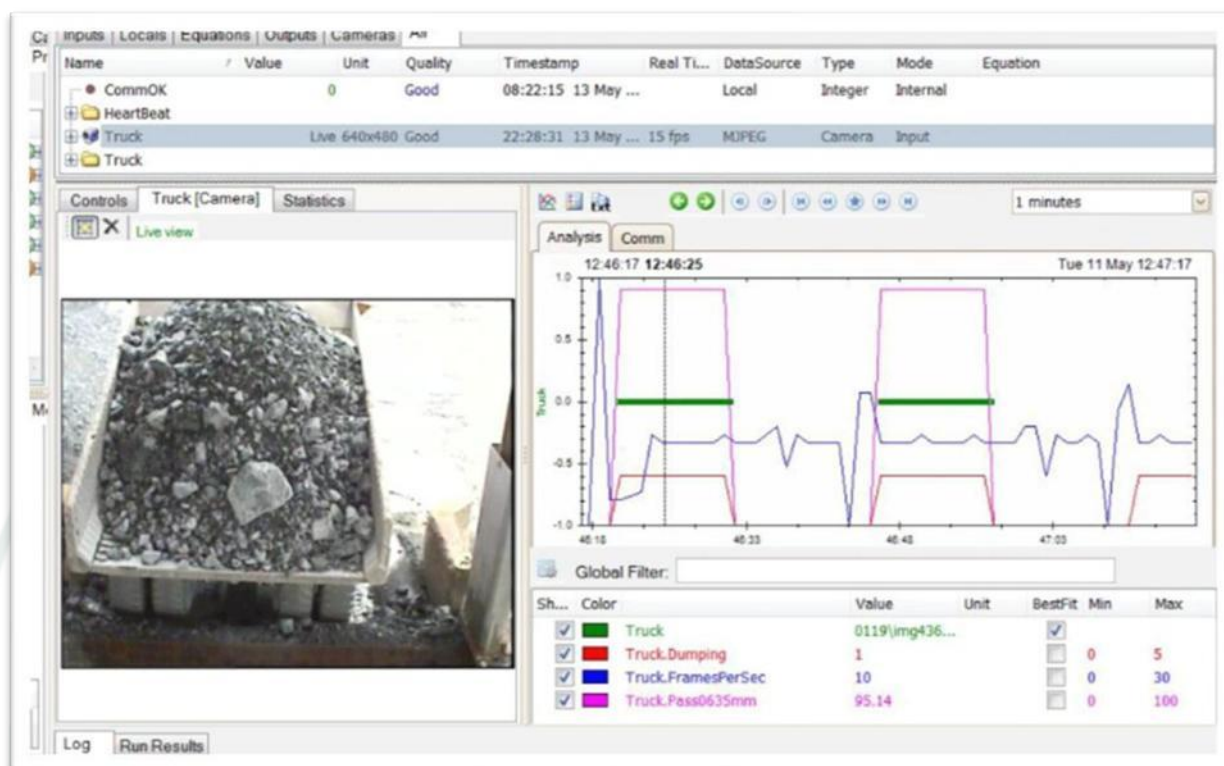


Tabla 15.

Parámetros de segundo periodo

Mes	T/H	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	2,845	14.7	6.5	0.596	1.20
Mes 2	2,857	14.8	6.5	0.594	1.20
Mes 3	2,841	14.8	6.5	0.594	1.21
Total	2,848	14.8	6.5	0.595	1.20

Nota: Parámetros de producción de carguío, consumo de energía, P80, Factor de carga y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

Durante el segundo periodo de evaluación, correspondiente a los meses de julio, agosto y septiembre de 2024, se implementaron mejoras significativas en el diseño de la voladura, enfocadas en la optimización del factor de carga. Esta modificación redistribuyó eficientemente la energía, mejorando directamente la fragmentación del macizo rocoso y, con

ello, la productividad en el proceso de carguío y reducción de costos operativos. En términos de producción de carguío (T/H), se observó un promedio de 2,848 toneladas por hora, con un desempeño estable en los tres meses evaluados: julio (2,845 T/H), agosto (2,857 T/H) y septiembre (2,841 T/H). Este incremento respecto al primer periodo representa una mejora de aproximadamente 14.27 %, y se vincula directamente con la disminución de bloqueos en la chancadora y una mayor eficiencia del ciclo de acarreo.

En lo que respecta al consumo de energía en chancado (KW-H/T), se registró una disminución significativa hasta alcanzar un promedio de 14.8 KW-H/T, gracias a la mejora en el tamaño de partícula que ingresa a la chancadora primaria. Esto representa una reducción energética de 11.23 % respecto al primer trimestre, lo cual no solo contribuye a la eficiencia operativa, sino que también implica un beneficio económico y ambiental.

El indicador clave de fragmentación (P80) mostró una mejora sustancial: se logró mantener un valor constante de 6.5 pulgadas en los tres meses, gracias al rediseño de la malla de perforación y al incremento técnico del factor de carga. Este resultado se encuentra validado tanto por el modelo de Kuz-Ram ajustado como por los datos obtenidos mediante el sistema Split Online, demostrando que la voladura fue más controlada y eficaz.

El factor de carga (KG/M³) promedió 0.595 kg/m³, distribuyéndose en valores consistentes de 0.596, 0.594 y 0.594 en los meses de julio, agosto y septiembre, respectivamente. Este parámetro refleja una dosificación técnica óptima de explosivo, que fue suficiente para alcanzar la fragmentación deseada sin incurrir en sobrerotura ni en proyecciones excesivas. Finalmente, el costo unitario de trituración (USD/T) se redujo de forma efectiva hasta alcanzar un promedio de 1.20 USD/T, lo cual representa una disminución del 11.93 % respecto al primer periodo.

En resumen, los datos del segundo periodo confirman que la optimización del factor de carga tuvo un impacto positivo integral sobre todos los indicadores críticos del ciclo de explotación, fortaleciendo así la eficiencia operativa de el caso de estudio.

Tabla 16.

Parámetros del primer y segundo periodo del mes 1

Mes 1	T/H	Primer periodo				USD/T	T/H	Segundo periodo				USD/T
		KW-H/T	P80	KG/M3				KW-H/T	P80	KG/M3		
1	2,425	16.9	9.7	0.506	1.36		2,863	14.8	6.3	0.589		1.19
2	2,548	16.3	10.1	0.528	1.39		2,801	14.6	6.8	0.605		1.20
3	2,433	16.1	9.9	0.517	1.38		2,815	14.7	6.9	0.583		1.18
4	2,559	16.5	9.7	0.505	1.40		2,894	14.5	6.7	0.603		1.18
5	2,580	17.1	9.1	0.543	1.36		2,816	14.5	6.9	0.583		1.19
6	2,568	16.3	9.5	0.507	1.39		2,821	14.6	6.9	0.597		1.20
7	2,428	17.1	9.4	0.522	1.33		2,857	14.8	6.6	0.595		1.18
8	2,442	16.6	10.6	0.546	1.33		2,823	14.9	6.1	0.592		1.23
9	2,434	17.0	9.2	0.531	1.38		2,804	14.7	6.3	0.584		1.21
10	2,400	16.8	9.5	0.554	1.38		2,821	14.6	6.7	0.611		1.20
11	2,538	16.2	10.8	0.533	1.40		2,881	15.0	6.7	0.600		1.22
12	2,443	16.4	11.0	0.505	1.40		2,865	15.0	6.1	0.589		1.19
13	2,494	16.8	10.1	0.540	1.40		2,866	15.0	6.5	0.602		1.19
14	2,403	16.7	10.9	0.545	1.38		2,818	15.0	6.1	0.589		1.22
15	2,426	17.0	9.4	0.521	1.39		2,887	14.7	6.1	0.608		1.20
16	2,591	16.8	10.5	0.508	1.36		2,818	15.0	6.7	0.590		1.23
17	2,428	17.0	10.2	0.520	1.33		2,833	14.7	6.9	0.591		1.20
18	2,499	16.4	9.7	0.540	1.38		2,896	14.9	6.6	0.585		1.21
19	2,417	17.1	9.8	0.502	1.33		2,848	14.7	6.7	0.593		1.23
20	2,462	16.5	9.3	0.532	1.40		2,825	14.9	6.4	0.590		1.19
21	2,436	16.6	10.5	0.535	1.34		2,849	14.5	6.2	0.602		1.19
22	2,438	16.4	9.9	0.538	1.35		2,870	14.9	6.4	0.583		1.18
23	2,487	16.4	9.0	0.501	1.40		2,838	14.5	6.3	0.597		1.22
24	2,538	17.1	9.6	0.543	1.37		2,845	14.7	6.7	0.593		1.23
25	2,487	16.8	9.9	0.550	1.33		2,833	14.8	6.6	0.600		1.18
26	2,453	16.8	9.6	0.542	1.37		2,816	14.6	7.0	0.606		1.19
27	2,471	16.1	10.8	0.528	1.40		2,866	14.6	7.0	0.609		1.21
28	2,461	16.8	10.8	0.507	1.36		2,897	14.6	6.0	0.605		1.20
29	2,466	17.1	9.5	0.527	1.35		2,826	14.9	6.1	0.608		1.18
30	2,415	16.5	11.0	0.508	1.39		2,884	14.8	6.1	0.590		1.18
Promedio	2,472	16.7	10.0	0.526	1.37		2,808	14.9	6.8	0.589		1.19

Nota: Parámetros de producción de carguío, consumo de energía, P80, Factor de carga y

costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

Tabla 17.*Parámetros del primer y segundo periodo del mes 2*

Mes 2	T/H	Primer periodo			USD/T	T/H	Segundo periodo			USD/T
		KW-H/T	P80	KG/M3			KW-H/T	P80	KG/M3	
1	2,590	16.5	10.1	0.528	1.33	2,844	15.0	6.9	0.596	1.20
2	2,569	16.5	9.4	0.508	1.39	2,867	14.9	6.9	0.593	1.18
3	2,588	16.4	9.4	0.552	1.38	2,867	14.8	6.3	0.583	1.19
4	2,532	17.0	10.8	0.534	1.39	2,853	14.9	6.7	0.606	1.21
5	2,518	16.7	10.2	0.501	1.37	2,842	15.0	6.2	0.585	1.22
6	2,546	16.8	9.5	0.526	1.33	2,826	14.7	6.1	0.591	1.20
7	2,535	16.2	9.3	0.520	1.38	2,884	14.9	6.8	0.606	1.23
8	2,457	16.3	10.1	0.504	1.36	2,885	14.5	6.8	0.588	1.23
9	2,490	16.5	10.7	0.504	1.34	2,833	14.9	6.5	0.587	1.20
10	2,464	17.1	10.8	0.534	1.33	2,853	14.6	6.5	0.599	1.23
11	2,444	16.7	9.7	0.522	1.38	2,829	14.6	6.3	0.596	1.23
12	2,490	16.6	9.7	0.541	1.40	2,853	14.6	6.1	0.604	1.23
13	2,586	16.9	11.0	0.542	1.40	2,893	14.8	6.3	0.591	1.20
14	2,412	16.8	9.5	0.520	1.37	2,893	14.6	6.2	0.586	1.20
15	2,461	17.0	10.2	0.514	1.40	2,886	14.9	6.8	0.605	1.19
16	2,524	16.5	11.0	0.520	1.33	2,889	14.7	6.1	0.594	1.22
17	2,560	16.4	9.8	0.543	1.39	2,891	14.7	6.8	0.591	1.18
18	2,457	16.4	10.9	0.540	1.33	2,806	14.8	6.4	0.594	1.21
19	2,501	16.3	10.0	0.512	1.40	2,890	15.0	6.1	0.600	1.18
20	2,562	16.8	9.8	0.500	1.35	2,800	14.7	6.4	0.595	1.18
21	2,479	16.2	9.5	0.512	1.39	2,853	15.0	6.7	0.602	1.23
22	2,489	16.8	10.7	0.512	1.40	2,857	14.7	6.9	0.594	1.21
23	2,478	16.6	9.5	0.548	1.39	2,887	14.8	7.0	0.591	1.20
24	2,565	17.0	9.9	0.547	1.36	2,815	14.8	6.1	0.583	1.20
25	2,504	16.2	10.5	0.525	1.34	2,852	15.0	6.4	0.592	1.20
26	2,412	16.2	10.9	0.542	1.34	2,864	14.8	6.3	0.583	1.21
27	2,581	16.3	10.3	0.529	1.33	2,826	14.6	6.2	0.599	1.20
28	2,424	16.2	9.1	0.515	1.34	2,861	14.9	6.3	0.602	1.21
29	2,413	16.9	9.3	0.517	1.36	2,896	14.6	6.8	0.601	1.20
30	2,572	16.1	9.1	0.541	1.36	2,847	14.6	6.5	0.596	1.18
31	2,442	16.6	10.4	0.504	1.37	2,833	14.9	6.6	0.593	1.20
Promedio	2,505	16.6	10.0	0.524	1.37	2,857	14.8	6.5	0.594	1.20

Nota. Parámetros de producción de carguío, consumo de energía, P80, Factor de carga y

costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

Tabla 18.*Parámetros del primer y segundo periodo del mes 3*

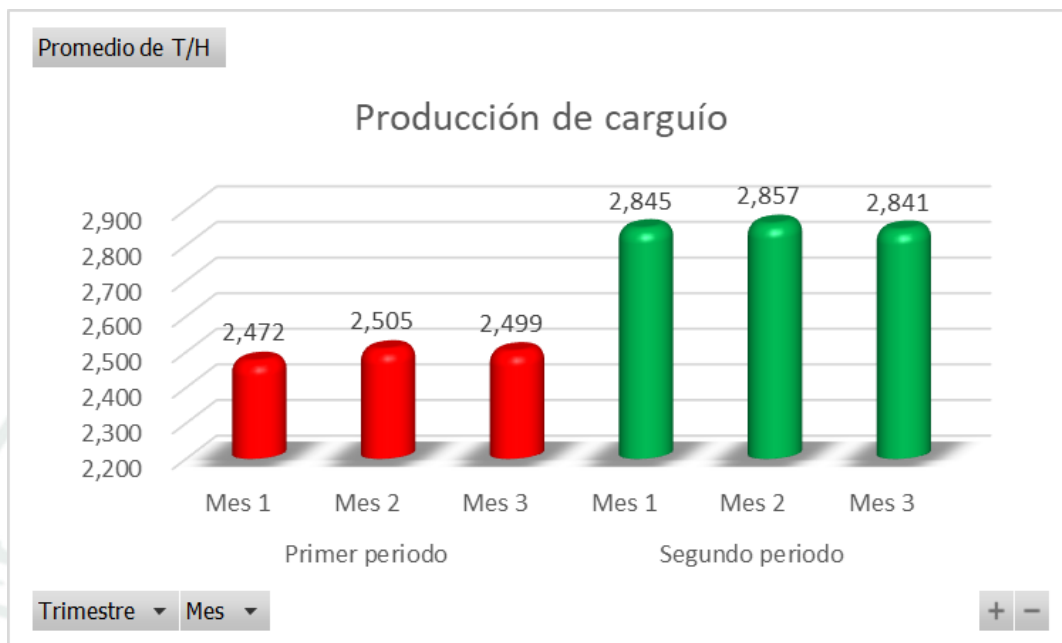
Mes 3	T/H	Primer periodo				USD/T	T/H	Segundo periodo				USD/T
		KW-H/T	P80	KG/M3				KW-H/T	P80	KG/M3		
1	2,552	16.2	9.9	0.551	1.38	2,899	14.8	6.7	0.599	1.22		
2	2,465	16.2	9.0	0.55	1.34	2,857	14.9	6.3	0.596	1.19		
3	2,499	17.0	10.9	0.516	1.40	2,806	14.7	6.1	0.598	1.22		
4	2,483	17.1	9.6	0.516	1.39	2,832	14.8	6.9	0.588	1.21		
5	2,442	16.8	10.3	0.553	1.34	2,804	14.8	6.4	0.586	1.18		
6	2,495	16.9	10.0	0.528	1.34	2,839	14.7	6.2	0.587	1.22		
7	2,428	16.2	10.2	0.545	1.38	2,878	14.9	6.6	0.587	1.22		
8	2,424	16.5	9.3	0.538	1.37	2,831	14.7	6.3	0.597	1.21		
9	2,480	16.2	10.8	0.504	1.40	2,809	14.6	6.5	0.583	1.21		
10	2,408	17.1	10.3	0.524	1.35	2,829	14.6	6.9	0.592	1.23		
11	2,541	16.3	10.5	0.532	1.33	2,857	14.7	6.9	0.603	1.23		
12	2,537	16.8	9.0	0.537	1.39	2,876	14.8	6.4	0.588	1.22		
13	2,559	16.9	10.3	0.525	1.33	2,807	14.8	6.9	0.598	1.20		
14	2,577	16.7	9.5	0.553	1.36	2,809	14.6	6.3	0.600	1.23		
15	2,586	16.5	9.7	0.534	1.40	2,857	14.9	6.8	0.603	1.21		
16	2,414	17.1	11.0	0.55	1.35	2,801	14.9	6.4	0.583	1.18		
17	2,528	17.0	9.7	0.502	1.40	2,838	15.0	6.4	0.592	1.23		
18	2,600	16.5	10.4	0.506	1.33	2,815	14.9	7.0	0.603	1.22		
19	2,504	16.8	10.2	0.542	1.37	2,894	14.5	6.1	0.590	1.20		
20	2,520	16.2	9.7	0.528	1.37	2,841	14.8	6.5	0.593	1.18		
21	2,464	17.0	9.8	0.526	1.38	2,813	15.0	6.1	0.595	1.19		
22	2,412	16.8	9.2	0.5	1.36	2,808	14.7	6.8	0.601	1.18		
23	2,445	16.5	10.5	0.529	1.40	2,841	14.9	6.3	0.594	1.19		
24	2,555	16.3	10.6	0.521	1.34	2,874	14.8	6.8	0.598	1.19		
25	2,453	17.0	10.1	0.501	1.33	2,871	14.6	6.2	0.584	1.23		
26	2,434	17.1	9.2	0.544	1.33	2,825	14.5	6.9	0.603	1.19		
27	2,495	16.3	10.1	0.519	1.40	2,802	14.7	6.1	0.587	1.23		
28	2,556	16.6	10.9	0.511	1.36	2,887	14.6	7.0	0.596	1.18		
29	2,582	16.7	9.0	0.522	1.33	2,877	14.9	6.1	0.602	1.22		
30	2,537	16.3	10.1	0.555	1.37	2,855	14.7	6.3	0.599	1.19		
Promedio	2,499	16.7	10.0	0.529	1.36	2,841	14.8	6.5	0.594	1.21		

Nota: Parámetros de producción de carguío, consumo de energía, P80, Factor de carga y

costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

Figura 15.

Producción del carguío



Nota: Producción del carguío de los meses del primer vs segundo periodo del 2024.

5.2.6. Producción de Carguío (T/H)

El gráfico de barras presenta la evolución de la producción promedio de los equipos de carguío (en toneladas por hora) durante los seis meses de estudio, distribuidos en dos periodos: el primer periodo (sin mejoras) y el segundo periodo (con implementación de mejoras en el factor de carga).

Durante el primer periodo, representado en barras rojas, se observa una producción promedio moderada con leves variaciones mensuales:

- Mes 1: 2,472 T/H
- Mes 2: 2,505 T/H
- Mes 3: 2,499 T/H

En contraste, durante el primer periodo, representado en barras verdes, se evidencia un incremento sostenido en la productividad:

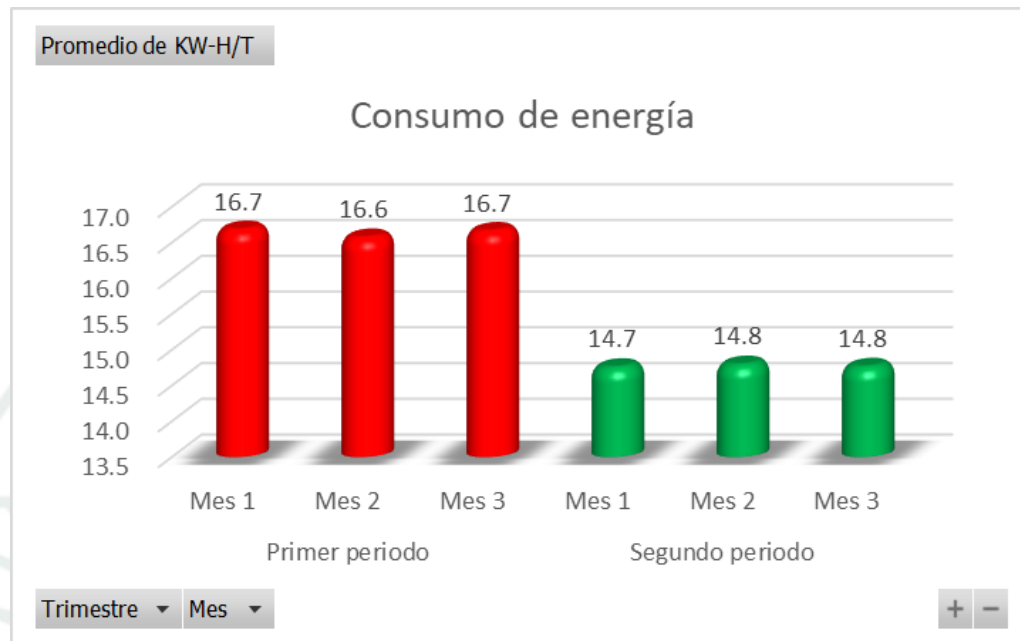
- Mes 1: 2,845 T/H
- Mes 2: 2,857 T/H
- Mes 3: 2,841 T/H

La comparación visual resalta claramente el efecto positivo de la optimización del factor de carga en las voladuras, logrando un aumento promedio de 14.2 % en la producción de carguío respecto al periodo anterior. Esta mejora se atribuye a la reducción del tamaño de fragmentación del material volado, lo que permitió a los equipos operar con mayor eficiencia, reduciendo tiempos de ciclo y aumentando el volumen de material cargado por hora.

El gráfico respalda cuantitativamente la hipótesis central de la investigación y demuestra el impacto directo de una estrategia técnica sobre un indicador clave del rendimiento operativo en minería a cielo abierto.

Figura 16.

Consumo de energía



Nota: Finos de los meses del primer vs segundo periodo del 2024.

5.2.7. Consumo de Energía (KW-H/T)

El gráfico de barras presenta el comportamiento del consumo específico de energía por tonelada procesada (KW-H/T) durante los tres meses correspondientes a cada uno de los dos periodos evaluados: el primer periodo (sin mejoras en la voladura) y el segundo periodo (con la optimización del factor de carga).

En el primer periodo, representado con barras rojas, se observa un consumo energético constante y elevado, con los siguientes promedios mensuales:

- Mes 1: 16.7 KW-H/T
- Mes 2: 16.6 KW-H/T
- Mes 3: 16.7 KW-H/T

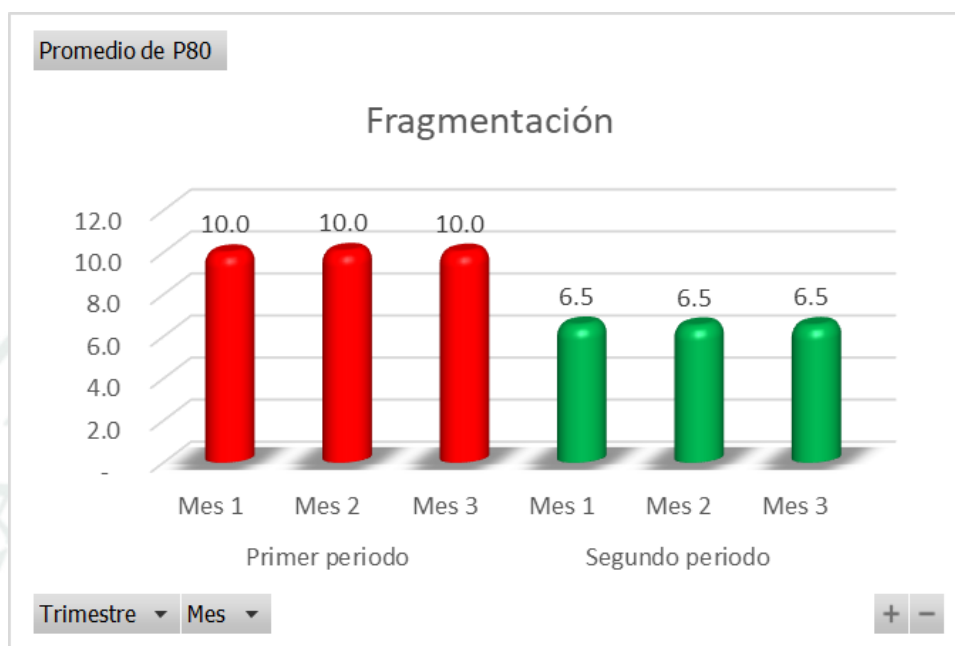
En cambio, durante el primer periodo, representado con barras verdes, se evidencia una reducción sostenida en el consumo de energía por tonelada:

- Mes 1: 14.7 KW-H/T
- Mes 2: 14.8 KW-H/T
- Mes 3: 14.8 KW-H/T

Esta reducción refleja una mejora del 11.1 % en eficiencia energética tras la implementación del diseño optimizado de voladura, lo cual se asocia directamente a la mejor fragmentación del material (menor P80). Al generarse fragmentos más pequeños y homogéneos, se reduce la resistencia al carguío y el esfuerzo de trituración requerido en la chancadora primaria, disminuyendo así la demanda de energía por tonelada procesada.

El gráfico evidencia que una voladura técnicamente optimizada no solo mejora la productividad, sino que también contribuye significativamente a la eficiencia energética del sistema mina-planta, reduciendo costos operativos y favoreciendo prácticas de minería más sostenibles.

Figura 17.
Fragmentación



Nota: Fragmentación de los meses del primer vs segundo periodo del 2024.

5.2.8. Fragmentación del Material (P80)

El gráfico presenta la evolución del P80, indicador que representa el tamaño en pulgadas por debajo del cual se encuentra el 80 % del material fragmentado producto de la voladura. Esta métrica es crítica para evaluar la calidad de la fragmentación, ya que afecta directamente la eficiencia de los procesos de carguío, chancado y molienda.

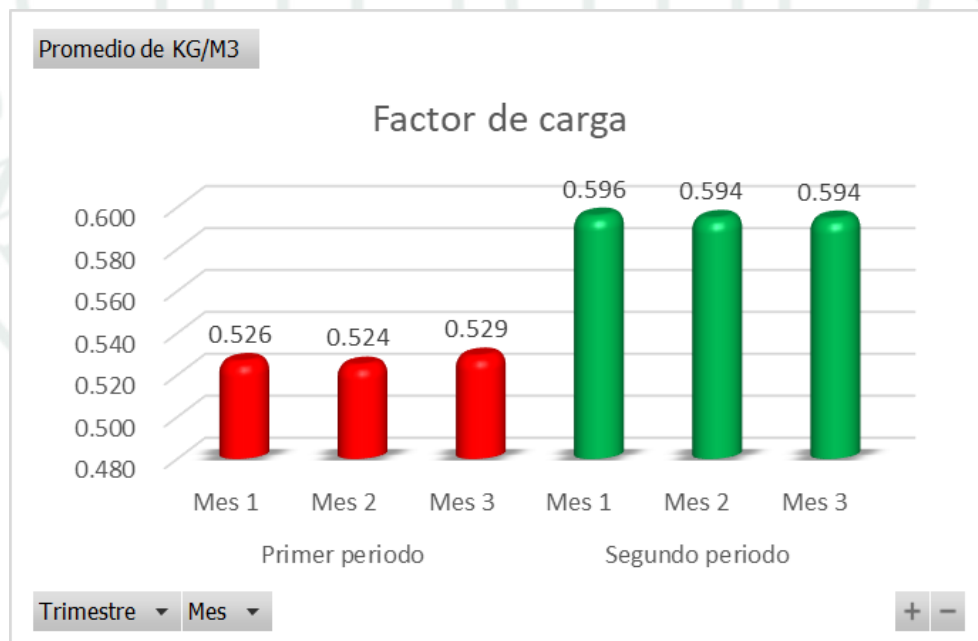
Durante el primer periodo (sin mejoras), representado por las barras rojas, se observa una fragmentación constante de 10 pulgadas en los tres meses evaluados, lo que evidencia una falta de control técnico sobre el diseño de voladura. Este tamaño de fragmento generaba mayores dificultades para el carguío, incremento en los tiempos de ciclo, uso frecuente de voladura secundaria y mayor desgaste en los equipos.

En contraste, durante el segundo periodo (con mejoras aplicadas en el factor de carga), representado por las barras verdes, el P80 se redujo de forma sostenida a 6.5 pulgadas en cada mes del trimestre. Esta reducción representa una mejora del 34.3 % en la fragmentación del material, lo que impactó positivamente en toda la cadena operativa, especialmente en la productividad del carguío y el consumo de energía.

Este resultado demuestra que el rediseño del factor de carga, basado en el modelo Kuz-Ram y validado con el software Split Online, logró una fragmentación más fina y uniforme, acorde con los requerimientos operacionales del sistema mina-planta. En consecuencia, el gráfico confirma que una estrategia técnica correctamente aplicada en voladura permite optimizar significativamente los resultados operativos y reducir los costos por retrabajo.

Figura 18.

Factor de carga



Nota: Factor de carga de los meses del primer vs segundo periodo del 2024.

5.2.9. *Factor de Carga (KG/M³)*

Se presenta la evolución mensual del factor de carga, expresado en kilogramos de explosivo por metro cúbico de roca (kg/m³), durante el primer y segundo periodo de estudio.

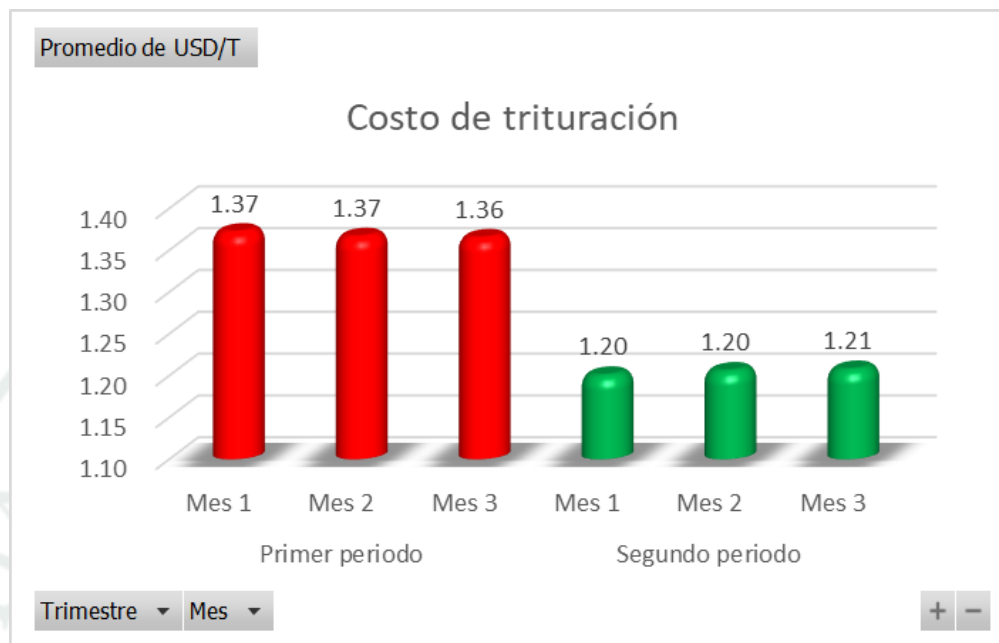
En el primer periodo (abril, mayo y junio 2024), los valores de factor de carga fueron bajos y relativamente constantes, oscilando entre 0.524 y 0.529 kg/m³, lo que refleja un diseño de voladura conservador, con una menor carga específica. Esta configuración provocó una fragmentación deficiente (P80 de 10 pulgadas), generando una mayor carga operativa sobre los procesos de chancado y carguío.

Durante el segundo periodo (julio, agosto y septiembre 2024), se implementó una optimización del diseño de voladura, incrementando el factor de carga hasta 0.596 kg/m³ en julio y estabilizándose en 0.594 kg/m³ en agosto y septiembre. Este incremento permitió una mejor distribución de la energía explosiva dentro del macizo rocoso, logrando una fragmentación más fina y controlada (P80 de 6.5 pulgadas).

La gráfica evidencia que incluso ligeros aumentos técnicos y controlados en el factor de carga pueden tener un efecto significativo en la calidad de fragmentación y el rendimiento global de la operación minera, contribuyendo a reducir costos y mejorar la eficiencia de los equipos de carguío.

Figura 19.

Costo de trituración



Nota: Costo de trituración de los meses del primer vs segundo periodo del 2024.

5.2.10. Costo de Trituración (USD/T)

El gráfico muestra la evolución del costo promedio de trituración por tonelada (USD/T) durante los dos periodos comparativos de la investigación: el primer periodo (sin mejora en voladura) y el segundo periodo (con optimización del factor de carga), correspondientes a los trimestres abril–junio y julio–septiembre de 2024, respectivamente.

Durante el primer periodo, representado por las barras rojas, el costo de trituración se mantuvo elevado y prácticamente constante:

- Mes 1: 1.37 USD/T
- Mes 2: 1.37 USD/T
- Mes 3: 1.36 USD/T

Estos valores reflejan un impacto negativo de la fragmentación deficiente ($P_{80} = 10''$), que generó mayor consumo de energía, tiempos prolongados de procesamiento, mayor desgaste de componentes del sistema de chancado y presencia frecuente de material sobredimensionado.

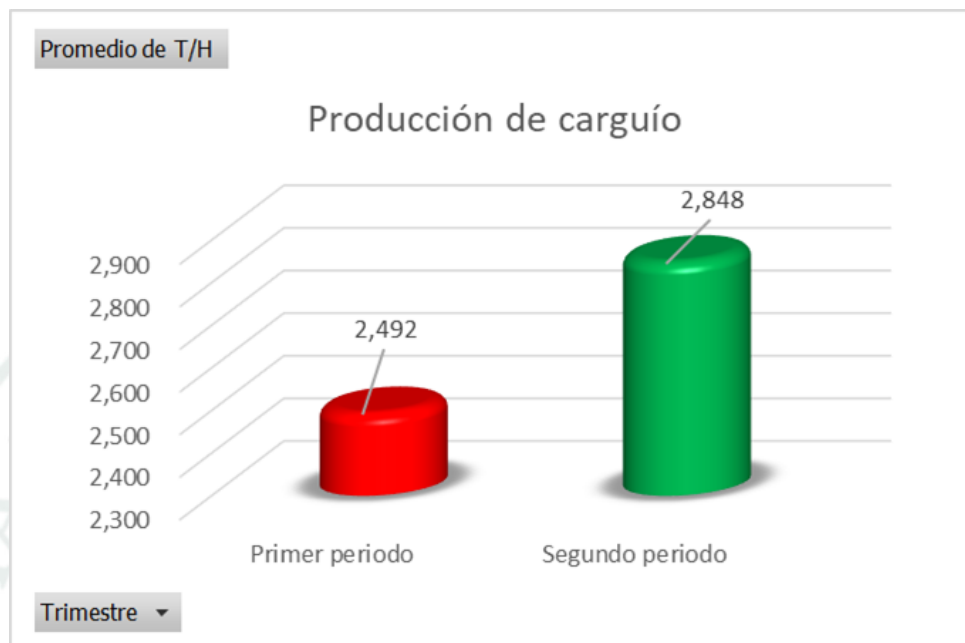
En el segundo periodo, indicado con barras verdes, se observa una reducción sostenida del costo de trituración, gracias a una mejor fragmentación del material volado ($P_{80} = 6.5''$):

- Mes 1: 1.20 USD/T
- Mes 2: 1.20 USD/T
- Mes 3: 1.21 USD/T

Esta reducción representa una disminución del 11.8 % en los costos operativos del chancado, atribuible directamente a la optimización del factor de carga. Al obtener fragmentos más pequeños y uniformes, se reduce la energía necesaria para la trituración, se minimiza el retrabajo y se optimiza el rendimiento de los equipos de reducción primaria. Este gráfico confirma que una voladura técnicamente mejorada no solo tiene beneficios operativos en el carguío, sino también un impacto económico directo y medible en los costos del procesamiento mineral, reforzando la validez técnica y financiera de la estrategia aplicada en el caso de estudio.

Figura 20.

Producción de carguío por periodo



Nota: Producción del primer y segundo periodo del 2024.

5.2.11. Producción de Carguío (T/H) por periodo

El gráfico presenta la comparación directa entre la producción promedio de los equipos de carguío durante el primer periodo (abril–junio 2024) y el segundo periodo (julio–septiembre 2024). Se observa un incremento significativo en la productividad como consecuencia de la implementación de un diseño optimizado del factor de carga.

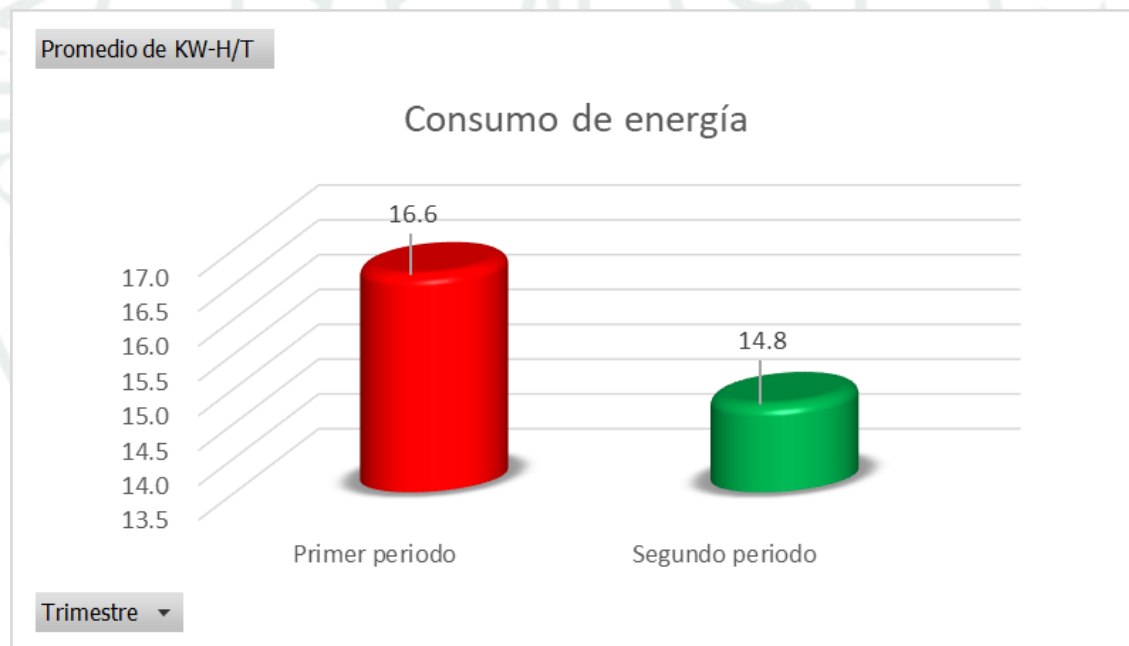
En el primer periodo, sin modificaciones en el diseño de voladura, la producción promedio se mantuvo en 2,492 toneladas por hora (T/H). Esta cifra refleja una operación estándar, limitada por la fragmentación deficiente del material (P80 = 10"), que provocaba rebote del cucharón, mayor esfuerzo por ciclo y una alta presencia de material sobredimensionado.

En el segundo periodo, tras la aplicación del nuevo diseño de voladura con un factor de carga incrementado a 0.595 KG/M3, la producción se elevó a 2,848 T/H, lo que representa una mejora del 14.27 %. Esta mejora operativa está directamente vinculada a la reducción del tamaño de fragmentación ($P_{80} = 6.5''$), lo cual facilitó el proceso de carguío y permitió una mayor eficiencia en el uso de palas y camiones.

El gráfico evidencia de forma clara el impacto positivo de la optimización del factor de carga sobre el rendimiento de los equipos de carguío, validando los objetivos de la investigación y demostrando que el rediseño de voladura no solo mejora la fragmentación, sino que también tiene efectos inmediatos y cuantificables sobre la productividad en campo.

Figura 21.

Consumo de energía por periodo



Nota: Consumo de energía primer y segundo periodo del 2024.

5.2.12. Consumo de Energía (KW-H/T) por periodo

El gráfico presenta la comparación entre el consumo promedio de energía por tonelada procesada (KW-H/T) durante el primer periodo (abril–junio 2024) y el segundo periodo (julio–septiembre 2024) en el caso de estudio.

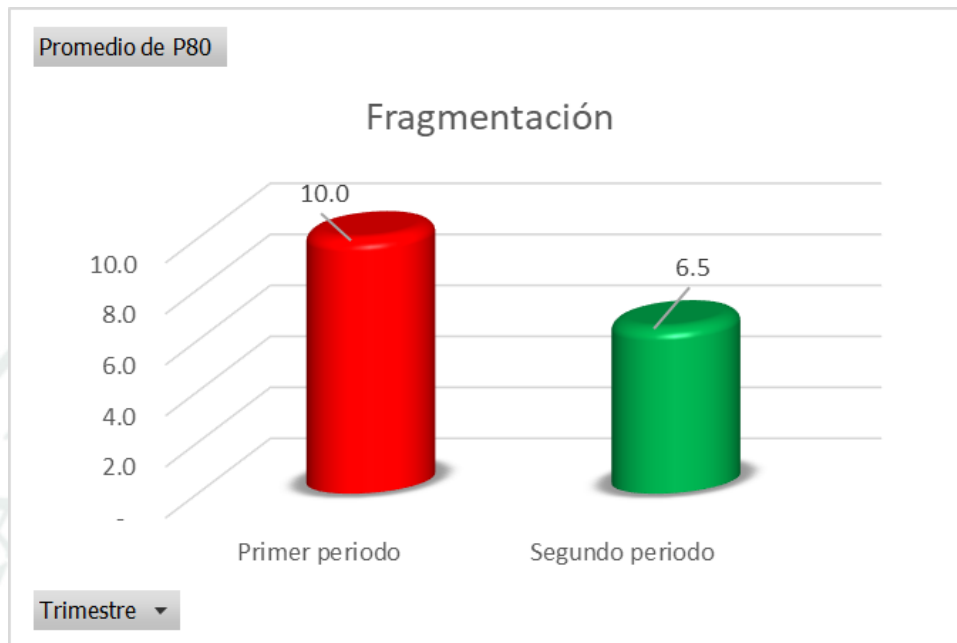
En el primer periodo, el consumo energético alcanzó un promedio de 16.6 KW- H/T, asociado a una fragmentación deficiente del material ($P_{80} = 10$ pulgadas), lo que exigía mayor esfuerzo mecánico durante el carguío y mayor trabajo en el sistema de chancado primario.

Con la implementación del diseño optimizado del factor de carga en el segundo periodo, el consumo energético se redujo a 14.8 KW-H/T, lo que representa una mejora del 11.23 %. Esta disminución se explica por la mejor fragmentación ($P_{80} = 6.5''$), que permitió un carguío más fluido y una trituración más eficiente, disminuyendo la resistencia al procesamiento del material.

El gráfico demuestra que, además de mejorar la productividad, la optimización del factor de carga contribuye a una mayor eficiencia energética, reduciendo el consumo por tonelada transportada y procesada. Este resultado es clave para reducir costos operativos y avanzar hacia una minería más sostenible y racional en el uso de recursos energéticos.

Figura 22.

Fragmentación por periodo



Nota: Fragmentación primer y segundo periodo del 2024.

5.2.13. Fragmentación (KW-H/T) por periodo

Compara el valor promedio del P80 —indicador que representa el tamaño bajo el cual se encuentra el 80 % del material volado— entre el primer periodo (abril-junio 2024) y el segundo periodo (julio-septiembre 2024).

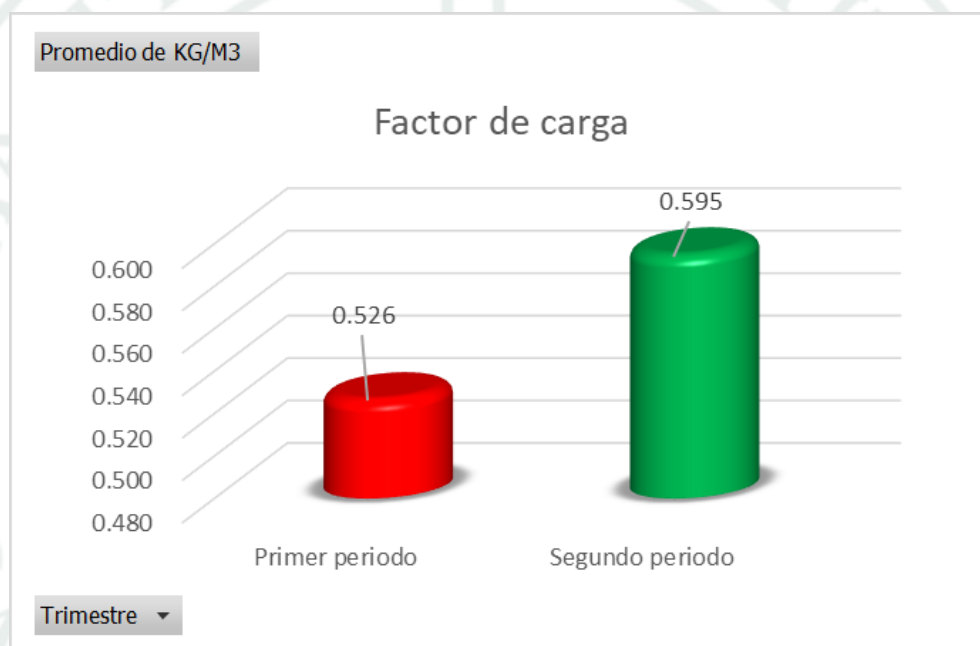
Durante el primer periodo, sin mejoras aplicadas, el tamaño de fragmentación se mantuvo en 10 pulgadas, reflejando una fragmentación deficiente, con presencia de material sobredimensionado que afectaba negativamente el carguío y el chancado primario.

En contraste, tras la implementación del diseño optimizado del factor de carga en el segundo periodo, el P80 se redujo a 6.5 pulgadas, evidenciando una mejora significativa del 34.93 % en la calidad de la fragmentación. Esta mejora fue validada a través del sistema Split Online, asegurando mediciones en tiempo real con alto grado de precisión.

La reducción del P80 tuvo un efecto directo sobre la eficiencia operativa, al facilitar el ingreso del material a los equipos de carguío, reducir la resistencia durante el chancado y disminuir la necesidad de retrabajos. En consecuencia, este indicador demuestra que el rediseño del factor de carga no solo mejoró la fragmentación, sino que también potenció el desempeño de toda la cadena mina-planta.

Figura 23.

Factor de carga por periodo



Nota: Factor de carga primer y segundo periodo del 2024.

5.2.14. Factor de Carga (KW-H/T) por periodo

Se muestra la variación del factor de carga, expresado en kilogramos de explosivo por metro cúbico de roca (kg/m^3), utilizado durante los dos periodos analizados en la investigación.

Durante el primer periodo (abril–junio 2024), el factor de carga fue de 0.526 kg/m^3 , correspondiente a un diseño tradicional de voladura con una carga inferior que no logró una fragmentación eficiente. Este diseño provocó la presencia de material sobredimensionado

(P80 = 10”) y un bajo aprovechamiento de la energía explosiva, lo que impactó negativamente la productividad y el consumo energético en el chancado.

En el segundo periodo (julio–septiembre 2024), se implementó un nuevo diseño de voladura, elevando el factor de carga a 0.595 kg/m³, lo que representó un incremento técnico del 12.97 %. Este ajuste permitió mejorar significativamente la distribución de la energía explosiva dentro del macizo rocoso, logrando una fragmentación más fina (P80 =6.5”) y, como resultado, un aumento de la productividad del carguío en 14.27 %, así como una reducción del consumo energético en 11.23 %.

El gráfico evidencia que el ajuste controlado del factor de carga es una variable técnica clave para lograr una voladura más eficiente, con beneficios medibles en toda la cadena operativa mina-planta.

Figura 24.

Costo de trituración por periodo



Nota: Costo de trituración primer y segundo periodo del 2024.

5.2.15. Costo de Trituración (KW-H/T) por Periodo

Se muestra la variación en el costo promedio de trituración por tonelada (USD/T) comparando el primer periodo (abril–junio) y el segundo periodo (julio–septiembre) del 2024. Durante el primer periodo, el costo de trituración fue de 1.37 USD/T, reflejando las consecuencias de una fragmentación deficiente ($P_{80} = 10''$) que generaba mayor esfuerzo en la chancadora primaria, aumento del tiempo de procesamiento, y mayor desgaste de componentes mecánicos por presencia de material sobredimensionado. En el segundo periodo, gracias a la aplicación de un diseño optimizado del factor de carga que permitió reducir el P_{80} a 6.5 pulgadas, el costo de trituración disminuyó a 1.20 USD/T, representando una reducción del 11.93 %. Esta mejora se traduce en menor retrabajo, menor consumo de energía y mayor eficiencia del sistema de conminución.

El gráfico evidencia que la mejora en la fragmentación no solo tiene un efecto técnico sobre la operación, sino también un impacto directo en la reducción de costos operativos, contribuyendo a una operación más rentable y sostenible en el mediano plazo.

Tabla 19.*Validación del modelo implementado*

	T/H	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	2,662	15.7	8.2	0.561	1.28
Primer periodo	2,472	16.7	10.0	0.526	1.37
Segundo periodo	2,845	14.7	6.5	0.596	1.20
Mes 2	2,681	15.7	8.3	0.559	1.29
Primer periodo	2,505	16.6	10.0	0.524	1.37
Segundo periodo	2,857	14.8	6.5	0.594	1.20
Mes 3	2,670	15.7	8.2	0.561	1.29
Primer periodo	2,499	16.7	10.0	0.529	1.36
Segundo periodo	2,841	14.8	6.5	0.594	1.21
Total general	2,671	15.7	8.2	0.561	1.28
Variación Mes 1	15.06%	-11.55%	-34.48%	13.19%	-12.50%
Variación Mes 2	14.08%	-10.74%	-35.35%	13.34%	-11.76%
Variación Mes 3	13.68%	-11.41%	-34.94%	12.38%	-11.53%
Primer periodo	2,492	16.6	10.0	0.526	1.37
Segundo periodo	2,848	14.8	6.5	0.595	1.20
Variación 1 vs 2 perio	14.27%	-11.23%	-34.93%	12.97%	-11.93%

Nota: Resultados de las pruebas de validación del modelo implementado.

5.2.16. Resultados Comparativos – Primer vs Segundo Periodo

La tabla presenta el análisis consolidado de los principales indicadores operativos evaluados durante los dos periodos de estudio en el caso de estudio, destacando el impacto de la optimización del factor de carga sobre el desempeño global del sistema de carguío.

5.2.16.1. Producción de Carguío (T/H).

Se evidenció un incremento significativo del 14.27 % en la producción promedio por hora, pasando de 2,492 T/H en el primer periodo a 2,848 T/H en el segundo. Este aumento está directamente relacionado con la mejora en la fragmentación del material, que redujo los tiempos por ciclo y permitió una mayor eficiencia en el uso de los equipos de carguío.

5.2.16.2. Consumo de Energía (KW-H/T).

El índice de consumo energético disminuyó de 16.6 a 14.8 KW-H/T, representando una mejora del 11.23 %. Esto confirma que la fragmentación más fina permitió una operación más eficiente, minimizando el esfuerzo energético por tonelada.

5.2.16.3. Fragmentación (P80).

Se logró una disminución sustancial del tamaño promedio del material volado, bajando de 10.0 a 6.5 pulgadas, lo que equivale a una mejora del 34.93 %. Esta reducción fue clave para desbloquear cuellos de botella en el sistema de carguío y evitar la generación de material sobredimensionado.

5.2.16.4. Factor de Carga (KG/M3).

El factor de carga aplicado aumentó de 0.526 a 0.595 KG/M3, es decir, un incremento del 12.97 %. Este ajuste técnico permitió distribuir mejor la energía de detonación en el macizo rocoso, logrando una fragmentación más controlada sin sobreroturas ni incremento desproporcionado en el uso de explosivo.

5.2.16.5. Costo de Trituración (USD/T).

Se registró una reducción del 11.93 % en el costo de trituración, pasando de 1.37 a 1.20 USD por tonelada. Esta disminución está relacionada con el menor desgaste de componentes del chancado, menor necesidad de voladura secundaria y reducción en el consumo energético del proceso de conminución.

En conjunto, los resultados validan que la optimización del factor de carga mediante un diseño técnico basado en el modelo Kuz-Ram y controlado por el software Split Online tuvo un impacto positivo integral: mejorando la productividad, reduciendo el consumo energético y disminuyendo los costos operativos, sin comprometer la seguridad ni estabilidad operativa.

5.3. Discusiones

Los resultados obtenidos evidenciaron una mejora sustancial en la fragmentación del macizo rocoso (P80), al pasar de 10.0 pulgadas en el primer periodo a 6.5 pulgadas en el segundo, producto directo de la optimización del factor de carga de 0.526 a 0.595 kg/m³. Este incremento controlado del explosivo por unidad de volumen contribuyó a una mayor energía específica liberada en la roca, lo que favoreció la formación de nuevas superficies de fractura y la disminución del tamaño promedio de los bloques.

Desde un enfoque técnico, tal como lo señala Cunningham (1987) en el modelo Kuz-Ram, el tamaño de fragmento P80 está directamente relacionado con la energía disponible por unidad de masa rocosa, así como con el diseño geométrico de la malla de perforación (burden y espaciamiento). En el segundo periodo, se adoptó una configuración de malla más eficiente (7.5 × 7.0 m), lo que permitió un mejor confinamiento de la carga explosiva y, en consecuencia, una mayor eficiencia de la voladura, sin necesidad de aumentar significativamente los costos operacionales ni la energía consumida en planta.

Además, según los principios descritos por Ash (1973), una voladura eficiente debe generar un patrón de fracturas extensas pero controladas, evitando tanto la subfragmentación como la sobrerotura. En ese sentido, la mejora observada en los indicadores de productividad del carguío (aumento de 14.27 %) y reducción del consumo energético en chancadora primaria (-11.23 %) están alineadas con los efectos esperados de una fragmentación óptima, tal como lo reportan también Sanchidrián et al. (2012) en sus estudios de correlación entre el diseño de voladura y el rendimiento post-voladura.

Por otro lado, la mejora operativa implementada cumple con los principios de seguridad y eficiencia operacional establecidos en el D.S. N° 024-2016-EM (Reglamento de

Seguridad y Salud Ocupacional en Minería), el cual estipula que todo diseño de voladura debe garantizar la estabilidad del banco, minimizar los riesgos de rebote de roca y evitar el uso excesivo de voladuras secundarias. Asimismo, se alineó con los criterios de la ISO 19296:2018, que promueve prácticas seguras y eficientes en maquinaria móvil de minería subterránea y superficial, dentro de un marco técnico y ambientalmente responsable.

En conclusión, la mejora en el factor de carga aplicada en esta investigación no solo generó un impacto técnico en la fragmentación, sino que también produjo un efecto en cascada sobre la eficiencia energética, el rendimiento del carguío y el costo unitario del proceso de chancado. La correlación positiva entre una mayor energía específica aplicada durante la voladura y la eficiencia operacional posterior, quedó estadísticamente comprobada con un nivel de significancia del 95 %, consolidando la validez del enfoque técnico y metodológico aplicado.

5.4. Contrastación de Hipótesis

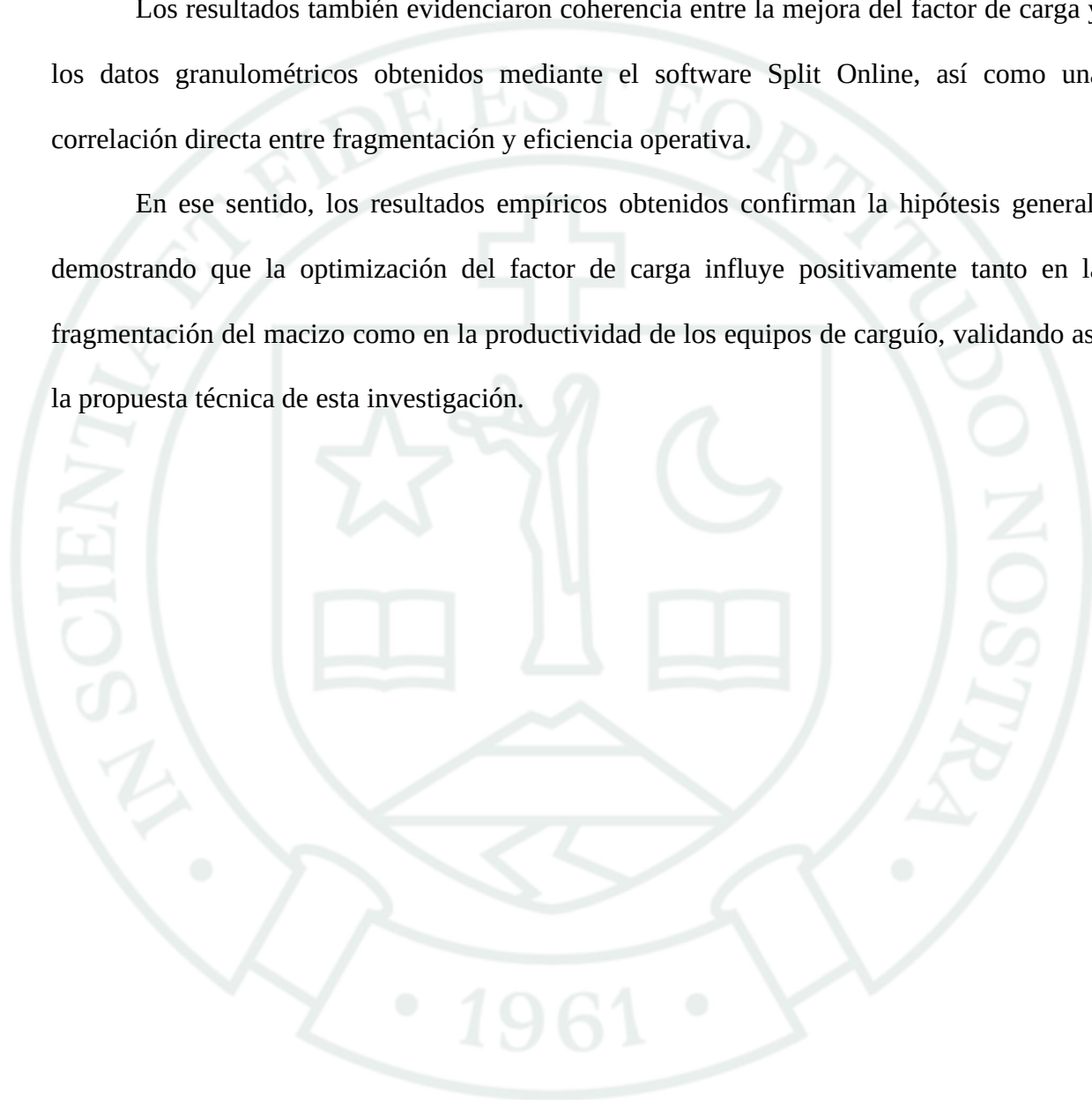
La hipótesis general planteada en la presente investigación fue: “La optimización del factor de carga en la voladura de rocas mejora la fragmentación del macizo y permite un aumento significativo en la productividad de los equipos de carguío en el caso de estudio.” Con base en el análisis comparativo entre los dos periodos operativos evaluados en el caso de estudio, se ha verificado que la implementación de un diseño optimizado del factor de carga (incrementándolo de 0.526 a 0.595 KG/M³) produjo una reducción significativa en el tamaño de fragmentación del material volado, pasando de 10 pulgadas (P80) a 6.5 pulgadas, lo que representa una mejora del 34.93 %.

Asimismo, dicha optimización permitió incrementar la productividad promedio de los equipos de carguío en un 14.27 %, aumentando de 2,492 T/H en el primer periodo a 2,848

T/H en el segundo. Esta mejora fue acompañada por una reducción del 11.23 % en el consumo de energía (KW-H/T) y una disminución del 11.93 % en el costo de trituración (USD/T), indicadores que refuerzan la validez técnica y económica del cambio aplicado.

Los resultados también evidenciaron coherencia entre la mejora del factor de carga y los datos granulométricos obtenidos mediante el software Split Online, así como una correlación directa entre fragmentación y eficiencia operativa.

En ese sentido, los resultados empíricos obtenidos confirman la hipótesis general, demostrando que la optimización del factor de carga influye positivamente tanto en la fragmentación del macizo como en la productividad de los equipos de carguío, validando así la propuesta técnica de esta investigación.



CONCLUSIONES

Conclusión general: La optimización del factor de carga de 0.526 kg/m³ a 0.595 kg/m³ en los diseños de voladura en la Unidad Minera Tipo A permitió reducir el tamaño de fragmentación promedio (P80) de 10.0 a 6.5 pulgadas, lo cual se tradujo en una mejora operativa integral. Esta reducción del 34.93 % en el P80 generó un incremento del 14.27 % en la productividad de los equipos de carguío (de 2,492 a 2,848 T/H), una disminución del 11.23 % en el consumo energético (de 16.6 a 14.8 KW-h/T), y una reducción del 11.93 % en el costo unitario de chancado (de 1.37 a 1.20 USD/T), validando así la hipótesis general planteada.

Respecto al primer objetivo específico: Se demostró que el diseño previo de voladura con un factor de carga de 0.526 kg/m³ y malla de perforación de 7.8 × 7.8 m generaba fragmentaciones sobredimensionadas (P80 de 10”), afectando negativamente la eficiencia del proceso. El rediseño con un patrón de 7.5 × 7.0 m y aumento controlado de carga permitió alcanzar el P80 objetivo de 6.5 pulgadas, lo cual mejoró la eficiencia operativa del sistema mine- to-mill.

Respecto al segundo objetivo específico: El análisis estadístico confirmó que la mejora del factor de carga se correlacionó significativamente ($p < 0.05$) con el incremento de la productividad del carguío, la cual pasó de 2,492 a 2,848 T/H. Asimismo, el coeficiente de correlación de Pearson fue de $R = -0.95$ entre el P80 y el T/H, evidenciando una relación inversa fuerte entre fragmentación y rendimiento operativo.

Respecto al tercer objetivo específico: Se comprobó que, al mejorar la fragmentación del mineral, el consumo energético en la chancadora primaria se redujo de 16.6 a 14.8 KW-H/T (-11.23 %), y el costo unitario de trituración bajó de 1.37 a 1.20 USD/T (-11.93 %). Esta mejora en eficiencia energética y económica se atribuye directamente a la liberación adecuada de energía explosiva y al aumento del confinamiento en el diseño de malla, confirmando los supuestos técnicos planteados.



RECOMENDACIONES

Establecer el factor de carga optimizado como estándar operativo en zonas similares del tajo. Dado que el incremento del factor de carga a un promedio de 0.595 KG/M3 generó mejoras comprobadas en la fragmentación y productividad, se recomienda implementar este valor como parámetro base en zonas con litología y condiciones geomecánicas equivalentes, previo análisis técnico de cada frente.

Mantener el uso sistemático del software Split Online para el monitoreo de fragmentación.

La implementación de este sistema permitió validar en tiempo real el P80 obtenido y hacer ajustes dinámicos. Se recomienda su uso continuo para monitorear desviaciones, identificar zonas con sobrerotura o sobredimensionamiento, y retroalimentar el diseño de voladura en campo.

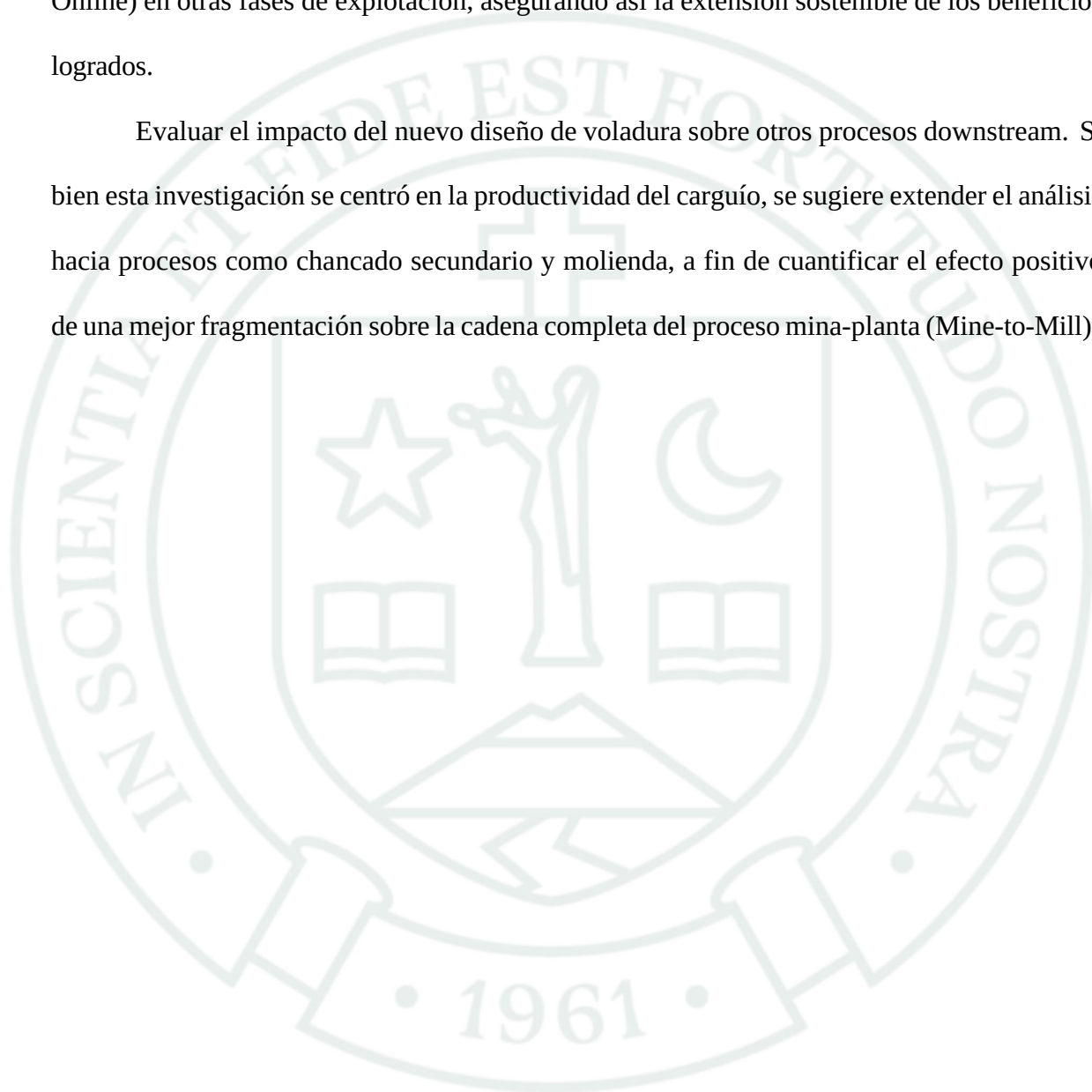
Integrar el análisis del factor de carga dentro de los sistemas de control de calidad de voladura.

El factor de carga debe considerarse como un indicador técnico clave en los reportes de desempeño operativo. Se sugiere integrarlo a los tableros de control de perforación y voladura, junto con el P80 y el consumo energético por tonelada, para facilitar la toma de decisiones basadas en datos.

Capacitar al personal técnico en el modelo Kuz-Ram y su aplicación práctica. Se recomienda brindar formación continua al personal de perforación y voladura sobre el uso del modelo Kuz-Ram, la interpretación de sus resultados y los criterios de ajuste de parámetros de diseño, con el fin de mejorar la predictibilidad de los resultados y la eficiencia del proceso.

Realizar campañas periódicas de validación del diseño optimizado en otras fases del tajo. Dado que las condiciones del macizo rocoso pueden variar por zona, se recomienda replicar la metodología aplicada (evaluación previa, ajuste de carga, validación con Split Online) en otras fases de explotación, asegurando así la extensión sostenible de los beneficios logrados.

Evaluar el impacto del nuevo diseño de voladura sobre otros procesos downstream. Si bien esta investigación se centró en la productividad del carguío, se sugiere extender el análisis hacia procesos como chancado secundario y molienda, a fin de cuantificar el efecto positivo de una mejor fragmentación sobre la cadena completa del proceso mina-planta (Mine-to-Mill).



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists. Wiley.
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Wiley.
- Casani Huamaní, J. C. (2022). Análisis técnico y económico de perforación y voladura para el control del grado de fragmentación en una mina a tajo abierto - 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12027/2/IV_FCE_318_TE_Casan
- Castillo, J. (2019). Metodología de la investigación aplicada a la ingeniería. Editorial Académica Española.
- Chura Torres, O. (2021). Aplicación de voladura controlada para mejorar la estabilidad de las paredes y taludes de banco en las fases de minado del tajo Tipo A [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio UNAP.
https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/20.500.14082/19541/3/Chura_Torres_Orlando.pdf
- Congreso Peruano de Energía, 12(1), 110-117.
- Cunningham, C. V. B. (1983). The Kuz–Ram fragmentation model–20 years on. In Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting.
- Cunningham, C. V. B. (2005). Fragmentation control and blast improvement in open pit mining. *Fragblast*, 9(3), 173–186.
- Gómez, R., & Martínez, A. (2020). Eficiencia eléctrica en operaciones mineras. *Revista de Ingeniería Eléctrica Aplicada*, 15(2), 45-53.

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Hustrulid, W., McCarter, M. K., & Van Zyl, D. (1999). Surface mining. SME. Hustrulid, W., McCarter, M. K., & Van Zyl, D. (1999). Surface mining. SME. Hustrulid, W., McCarter, M. K., & Van Zyl, D. (1999). Surface mining. SME.
- Jiménez, A. (2018). Optimization of drilling and blasting practices in open-pit mining operations [Tesis de maestría, Universidad de Chile].
- Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (2011). Productivity analysis of loading equipment in surface mining using fuzzy logic. *International Journal of Mining Science and Technology*, 21(5), 723–728.
- Mendoza, P., Salazar, J., & Ugarte, V. (2019). Optimización del factor de carga en sistemas industriales. *Revista de Energía y Automatización*, 9(1), 33-40.
- Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Montoya Villalta, F. A. (2019). Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en el Toquepala - Southern Perú Copper Corporation 2018 [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/d839a4f9-72bd-4694-a50b-4ebe8a06d55d>
- Ramos, D., & Lazo, E. (2018). Impacto del bajo factor de carga en operaciones mineras. [s_Ninahuanca_2022.pdf](#)
- Salinas Canal, K. R., & Ninahuanca Chumbe, J. R. (2022). Análisis de las variables operacionales de perforación y voladura, y su incidencia en el rendimiento de los equipos de carguío bajo el concepto mine to mill, en una mina a tajo abierto - 2021 [Tesis de licenciatura,

Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11378/1/IV_FIN_110_TE_Salina

- Salinas, P. (2022). Análisis de las variables operacionales de perforación y voladura y su incidencia en el rendimiento de equipos de carguío bajo el concepto mine to mill en una mina a tajo abierto – 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio institucional.
- Sanchidrián, J. A., Ouchterlony, F., Moser, P., & Segarra, P. (2012). Performance of explosives and new methods of prediction. In Proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting.
- Smith, J. D. (2019). Evaluation of controlled blasting techniques to improve slope stability in open-pit mines [Master's thesis, The University of Queensland]. The University of Queensland, Brisbane.
- Split Engineering. (2021). Split-Online: Fragmentation Size Analysis System. <https://www.spliteng.com/products/split-online>



Anexo 1. Mina Toquepala



Fuente: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024.

Anexo 2. Pala eléctrica de cable P&H 4100 operando en banco de tajo abierto.



Fuente: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024.

Anexo 3. Caso de estudio A



Fuente: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024

Anexo 4. Caso de estudio B



Fuente: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024

Anexo 5. Caso de estudio C



Fuente: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024

Anexo 6. Caso de estudio D



Fuente: Unidad Minera en el Caso de Estudio, 2024