

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**GESTIÓN DEL CONTROL DE VIBRACIONES EN FALLAS
ACTIVAS AL IMPLEMENTAR MEJORAS EN LA
VOLADURA DE ROCAS EN UNA MINA
SUPERFICIAL, MOQUEGUA, 2024**

TESIS

Presentada por:

Bach. Juan Luis Fernandez Poma

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA - PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

GESTIÓN DEL CONTROL DE VIBRACIONES EN FALLAS ACTIVAS AL IMPLEMENTAR MEJORAS EN LA VOLADURA DE ROCAS EN UNA MINA SUPERFICIAL, MOQUEGUA, 2024

Tesis sustentada y aprobada el 13 de marzo de 2026, estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Dante Luis Morales Cabrera

1er. MIEMBRO
(SECRETARIO)


.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

2do. MIEMBRO
(VOCAL)


.....
Dr. Jorge José Segura Dávila

ASESOR


.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Julio Miguel Fernández Prado, en mi condición de ASESOR acreditado por la RESOLUCIÓN DE FACULTAD N° 9126-2024-FAIN/UNJBG del trabajo de investigación (tesis) titulado: **"GESTIÓN DEL CONTROL DE VIBRACIONES EN FALLAS ACTIVAS AL IMPLEMENTAR MEJORAS EN LA VOLADURA DE ROCAS EN UNA MINA SUPERFICIAL, MOQUEGUA, 2024"**, presentado por **bachiller**: Juan Luis Fernandez Poma para optar el título profesional de INGENIERO DE MINAS. Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que, según la revisión, evaluación y análisis realizados del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel similitud permitido cuyo porcentaje es de 13 %.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILITUD de la tesis está de acuerdo a nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional de la UNJBG. Se emite el presente certificado con fines de continuar con los tramites respectivos para su obtención del título profesional de Ingeniero de Minas.

Tacna, 1 de junio del 2026



Dr. Julio Miguel Fernández Prado
ORCID: 0000-0002-3243-4255
DNI:29400045
ASESOR





Bach. Juan Luis Fernandez Poma
DNI:48288794
TESISTA



Agradecimiento

La presente investigación lo dedico principalmente a Dios, por darme la inspiración y la fuerza de seguir en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

Agradezco de corazón a mi familia, en especial a mis padres, por su amor, apoyo emocional y por enseñarme a no rendirme. A mis hermanos, por su compañía constante y sus palabras de aliento. A mis amigos, por estar presentes en los buenos y malos momentos, y por brindarme su apoyo incondicional.

A mi asesor de tesis, por su guía, paciencia y por compartir sus conocimientos con compromiso y dedicación a lo largo de este proceso.

Gracias también a quienes, de una u otra forma, me acompañaron y aportaron en este camino. Este logro es tan mío como de ustedes.

Dedicatoria

A mis padres, por su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y su constante apoyo en cada etapa de mi formación.

A mi familia, por confiar en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mis docentes y compañeros de carrera, por acompañarme en este camino de aprendizaje y crecimiento profesional.

Y, en especial, a la tierra minera que me inspira, por recordarme cada día que el conocimiento también se construye desde las entrañas de la roca.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Descripción y formulación del problema	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación e importancia de la investigación	4
1.5. Limitaciones y viabilidad	5
1.6. Hipótesis	5
1.6.1. Hipótesis principal.....	5
1.6.2. Hipótesis específica	5
1.7. Variables.....	5
1.7.1. Definición conceptual y operacional de las variables	5
1.7.2. Operacionalización de las variables	6

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes del trabajo de investigación	7
2.2. Bases teóricas sobre el trabajo de investigación	9
2.2.1. Minería	9
2.2.2. Minería superficial	9
2.2.3. Perforación	9
2.2.4. Voladura de rocas.....	9
2.2.5. Factor de potencia	10
2.2.6. Fragmentación.....	10
2.2.7. Costo de los explosivos.....	10
2.2.8. Explosivo	10
2.2.9. ANFO.....	11
2.2.10. Emulsión	11
2.2.11. Heavy ANFO	11
2.2.12. Vibraciones	11
2.2.13. Fallas activas	12
2.2.14. Estabilidad de taludes.....	12
2.2.15. Prevención de Deslizamientos	12
2.2.16. Caracterización del macizo rocoso	14
2.2.17. Geología estructural	15
2.2.18. Operaciones unitarias	16
2.2.19. Perforación	16
2.2.20. Perforación de producción	17
2.2.21. Voladura.....	18
2.2.22. Taladro	20

2.2.23. Explosivos y accesorios utilizados actualmente en mina.....	21
2.2.24. Burden	21
2.2.25. Espaciamiento	21
2.2.26. Malla	21
2.2.27. Fragmentación.....	22
2.2.28. Definición del índice P80 en fragmentación.....	22
2.2.29. Split on line	23
 CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	24
3.1. Tipo y nivel de la investigación	24
3.1.1. Método de la investigación	24
3.1.2. Tipo de la investigación	24
3.2. Nivel de la investigación.....	24
3.3. Diseño de la investigación	24
3.4. Población y muestra	25
3.4.1. Población.....	25
3.4.2. Muestra.....	25
3.5. Equipos y materiales	25
3.6. Procedimientos de las pruebas experimentales	26
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	27
3.7.1. Para la variable independiente:	27
3.7.2. Para la variable dependiente:	27
3.8. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos	27
 CAPÍTULO IV: RESULTADOS	28
4.1. Descripción de las pruebas experimentales	28

4.2.	Aplicación del método Kuz-Ram en el tercer trimestre.....	28
4.3.	Predicción de la Fragmentación mediante Kuz-Ram.....	29
4.3.1.	Factor de potencia volumétrico.....	29
4.3.2.	Tamaño medio de fragmentación, modelo Kuznetsov.....	30
4.3.3.	Índice de uniformidad de Rosin-Rammler.....	30
4.3.4.	Cálculo del P80 mediante Rosin-Rammler.....	31
4.4.	Parámetros de Perforación y Voladura Segundo vs Tercer Trimestre.....	31
4.5.	Resultados respecto a los objetivos.....	33
4.5.1.	Resultado respecto al objetivo general.....	33
4.5.2.	Resultados respecto a los objetivos específicos 1	34
4.5.3.	Resultados respecto a los objetivos específicos 2	34
4.5.4.	Resultados respecto a los objetivos específicos 3.....	35
4.5.5.	Comentario del gráfico: Promedio de t/h por trimestre	42
4.5.6.	Comentario del gráfico: Promedio de USD/t por trimestre	43
4.5.7.	Comentario del gráfico: Promedio de P80 por trimestre	44
4.5.8.	Comentario del gráfico: Promedio de kg/t por trimestre	45
4.5.9.	Comentario del gráfico: Promedio de Vibraciones (mm/s) por trimestre..	46
4.6.	Aplicación de la Norma DIN 4150-3 para la Evaluación de Vibraciones.	47
4.7.	Presentación y análisis de los resultados.....	50
4.7.1.	Estadística aplicada para la demostración de la optimización	50
4.8.	Zona de interacción estructural y voladura	54
4.9.	Sustento técnico de la optimización del diseño de voladura.....	55
CAPÍTULO V: DISCUSIONES.....		57
5.1.	Pruebas de validación del modelo experimental.....	57
5.2.	Aplicación de la tecnología encontrada	57

5.2.1. Comentario general de resultados	58
5.2.2. Comentario mensual (Meses 1, 2 y 3).....	59
5.2.3. Conclusión del análisis general.....	60
5.3. Contraste con trabajos de investigación similares	60
5.4. Contrastación de hipótesis	64
5.4.1. Hipótesis general:.....	64
5.4.2. Prueba estadística utilizada:	65
5.4.3. Resultados de la prueba:	66
5.4.4. Interpretación:	66
5.4.5. Conclusión de la contrastación:	66
Conclusiones.....	67
Recomendaciones	68
Referencias bibliográficas.....	69
ANEXOS	71

Índice de tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables.....	6
Tabla 2	Parámetros del segundo trimestre.....	28
Tabla 3	Parámetros del tercer trimestre.....	29
Tabla 4	Parámetros Segundo vs Tercer Trimestre.....	32
Tabla 5	Parámetros del tercer trimestre.....	33
Tabla 6	Parámetros abril 2023.....	36
Tabla 7	Parámetros mayo 2023.....	37
Tabla 8	Parámetros junio 2023.....	38
Tabla 9	Parámetros julio 2023.....	39
Tabla 10	Parámetros agosto 2023.....	40
Tabla 11	Parámetros septiembre 2023.....	41
Tabla 12	Pruebas de normalidad.....	51
Tabla 13	Prueba de normalidad.....	52
Tabla 14	Prueba estadística T-Wilcoxon.....	53
Tabla 15	Validación del modelo experimental.....	58

Índice de figuras

Figura 1.	Fuerzas actuantes en la estabilidad de talud	14
Figura 2.	Sección geológica	15
Figura 3.	Proceso operaciones mina	16
Figura 4.	Perforación en tajo	18
Figura 5.	Distribución de carga	20
Figura 6.	Producción	42
Figura 7.	Costo de voladura	43
Figura 8.	Fragmentación	44
Figura 9.	Factor de potencia	45
Figura 10.	Vibraciones	46
Figura 11.	Resultados de vibración comparados con los límites establecidos en la norma DIN 4150-3.	49
Figura 12.	Clasificación de vibraciones según zonas de seguridad DIN 4150-3.	50
Figura 13.	Control estructural de la Mina Minera Superficial	55

Índice de anexos

Anexo 1	Matriz de consistencias.....	73
Anexo 2	Plano Geologico de una Mina Superficial	73
Anexo 3	Fallas Fase 8E.....	74
Anexo 4	Dirección de fallas	75
Anexo 5	Direccion de fallas	76
Anexo 6	Vista del tajo	77

RESUMEN

La presente investigación evalúa el impacto de la optimización del diseño de voladura sobre el control de vibraciones en zonas con fallas activas en una mina superficial ubicada en Moquegua, durante el segundo y tercer trimestre del año 2023. Se aplicó una metodología cuantitativa con diseño longitudinal, utilizando la prueba estadística de Wilcoxon para muestras relacionadas, a fin de comparar los indicadores operativos antes y después de la mejora.

Los resultados demostraron mejoras significativas: incremento de la producción en 9.66%, reducción del costo unitario de voladura en 9.87%, mejora de la fragmentación en 29.32%, disminución del factor de potencia en 6.17% y reducción de las vibraciones en 38.08%. Se concluye que el rediseño de voladuras permite controlar efectivamente las vibraciones, mejorar la seguridad en frentes cercanos a fallas activas y optimizar el desempeño global del proceso minero.

Palabras clave: Voladura, vibraciones, fallas geológicas, fragmentación, eficiencia operativa.

ABSTRACT

This research evaluates the impact of blast design optimization on vibration control in areas with active faults at a surface mine located in Moquegua, during the second and third quarters of 2023. A quantitative, longitudinal methodology was applied, using the Wilcoxon test for related samples to compare operational indicators before and after the implementation of improvements.

The results showed significant improvements: a 9.66% increase in production, a 9.87% reduction in blasting unit cost, a 29.32% improvement in rock fragmentation, a 6.17% decrease in powder factor, and a 38.08% reduction in vibration levels. It is concluded that optimized blasting design enables effective vibration control, enhances safety near geological faults, and improves the overall efficiency of the mining process.

Keywords: Blasting, vibrations, geological faults, fragmentation, operational efficiency.

INTRODUCCIÓN

La gestión del control de vibraciones en fallas activas durante la voladura de rocas en minas superficiales es un desafío crucial para mantener la seguridad y estabilidad geotécnica de las operaciones. Las vibraciones generadas por las explosiones pueden afectar negativamente la integridad de las estructuras geológicas, especialmente en áreas con fallas activas. Estas fallas representan zonas de debilidad donde el movimiento o desplazamiento de los estratos puede amplificarse debido a la energía liberada por las voladuras. Para abordar este desafío, es fundamental implementar mejoras en las técnicas de voladura que minimicen la magnitud de las vibraciones y su impacto en las fallas.

En este contexto, la incorporación de tecnologías avanzadas, como los sistemas de monitoreo sismográfico y los modelos predictivos de vibraciones, resulta esencial. Estos sistemas permiten evaluar con mayor precisión los niveles de vibración en función de la cantidad de explosivos utilizados y la proximidad a fallas activas. Así, se pueden ajustar los parámetros de diseño de las voladuras, como el tamaño de la malla, el espaciado entre perforaciones y la cantidad de explosivos por disparo, para reducir el impacto en la estabilidad del terreno.

La implementación de estas mejoras no solo optimiza el proceso de voladura, sino que también asegura la continuidad de las operaciones mineras en condiciones seguras. Además, al gestionar adecuadamente las vibraciones, se minimizan los riesgos de daño a las infraestructuras cercanas y a los equipos, lo que contribuye a la eficiencia operativa y la reducción de costos por reparaciones o interrupciones. La optimización del diseño de voladuras también tiene un impacto positivo en la fragmentación de la roca, lo que mejora la productividad en las etapas posteriores del procesamiento del mineral.

Finalmente, esta gestión integral de las vibraciones en zonas de fallas activas es esencial para garantizar el cumplimiento de las normativas de seguridad y protección ambiental. En muchos países, existen regulaciones estrictas sobre los niveles permitidos de vibración, y el incumplimiento de estas normativas puede generar sanciones

económicas y problemas legales. Por tanto, la gestión eficaz de las voladuras en áreas con fallas no solo tiene implicaciones técnicas, sino también legales y operacionales para la empresa minera.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Antecedentes

La voladura es un procedimiento fundamental en la minería, empleado para romper el mineral y facilitar su extracción. No obstante, este proceso produce vibraciones sísmicas que pueden impactar negativamente las estructuras circundantes, el medio ambiente y, especialmente, las fallas geológicas activas en la zona de operación. Controlar estas vibraciones es crucial para asegurar la seguridad, la eficiencia operativa y la sostenibilidad de las actividades mineras.

Las vibraciones producidas por las voladuras pueden provocar movimientos en fallas geológicas activas, lo que puede llevar a la inestabilidad de las paredes del tajo, daños en infraestructuras cercanas y riesgos para la seguridad del personal. Además, una fragmentación deficiente del mineral debido a una voladura mal ejecutada puede afectar negativamente la eficiencia de la chancadora y otros procesos subsiguientes. Por ello, el principal reto es desarrollar y aplicar técnicas eficaces para controlar las vibraciones de las voladuras, minimizando su impacto en las fallas activas y mejorando la fragmentación del mineral.

1.2. Descripción y formulación del problema

La voladura es un proceso crucial en la minería que permite fragmentar el mineral para su posterior procesamiento. No obstante, este método produce vibraciones sísmicas que pueden tener varios efectos adversos. Las fallas geológicas activas presentes en la zona de operación son particularmente susceptibles a estas vibraciones, lo que presenta importantes desafíos en cuanto a seguridad y eficiencia operativa.

Es por ello que surge la duda si existiera la manera de lograr el control de vibraciones que afectan las fallas activas mediante la mejora del proceso de voladura. La interrogante es ¿Es factible lograr una gestión del control de vibraciones en fallas activas al implementar mejoras en la voladura de rocas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Lograr monitorear las fallas activas con la propuesta del control de las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas en una mina superficial, Moquegua, 2024.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar cómo influye las vibraciones en fallas activas el mejorar la fragmentación al implementar mejoras en la voladura de rocas.
- Determinar cómo influye las vibraciones en fallas activas el mejorar factor de potencia al implementar mejoras en la voladura de rocas.
- Determinar cómo influye las vibraciones en fallas activas el mejorar el costo de voladura al implementar mejoras en la voladura de rocas.

1.3. Justificación e importancia de la investigación

El control de vibraciones en las voladuras es esencial en la minería, particularmente en áreas con fallas geológicas activas. Las vibraciones producidas durante las voladuras pueden inducir movimientos en estas fallas, comprometiendo la estabilidad de las paredes del tajo y las estructuras cercanas. Además, las vibraciones excesivas pueden causar daños considerables a infraestructuras mineras y no mineras, incrementando los costos de mantenimiento y reparación. Por lo tanto, es vital implementar medidas efectivas de control de vibraciones para minimizar estos riesgos y garantizar la continuidad y eficiencia de las operaciones mineras.

1.4. Limitaciones y Viabilidad

El área de estudio se desarrollará en una Mina Superficial, Moquegua. La presente investigación se elaborará en los días establecidos en el cronograma de ejecución de cada mes y tendrá una duración aproximada de tres meses del año 2024.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis Principal

- La implementación de mejoras en el diseño de voladura reduce significativamente los niveles de vibración, lo que permite un control efectivo del comportamiento de fallas activas y mejora los indicadores operativos en una mina superficial.

1.5.2. Hipótesis Específica

- Es probable que al monitorear las fallas activas influya en la mejora de la fragmentación al implementar mejoras en la voladura de rocas, Moquegua, 2024.
- Es probable que al monitorear las fallas activas influya en la mejora del factor de potencia al implementar mejoras en la voladura de rocas, Moquegua, 2024.
- Es probable que al monitorear las fallas activas influya en la mejora del costo de voladura al implementar mejoras en la voladura de rocas, Moquegua, 2024.

1.6. Variables

1.6.1. Definición conceptual y operacional de las variables

- **Variable independiente:** Son las variables explicativas, o sea, los factores o elementos susceptibles de explicar las variables dependientes (en un experimento son las variables que se manipulan). Cauas, D. (2015).

Variable independiente: Vibraciones

- **Variable dependiente:** Reciben este nombre las variables a explicar, o sea, el objeto de la investigación, que se trata de explicar en función de otros elementos. Cauas, D. (2015).

Variable dependiente: Control de fallas activas

1.6.2. Operacionalización de las Variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Indicador	Medición	Unidad
Independiente	Son las variables explicativas, o sea, los factores o elementos susceptibles de explicar las variables dependientes (en un experimento son las variables que se manipulan). Cauas, D. (2015).	Vibraciones	- Máximo permisible -Fragmentación -Factor de potencia -Costo	-mm/s -% -kg/t -\$/T
Dependiente	Reciben este nombre las variables a explicar, o sea, el objeto de la investigación, que se trata de explicar en función de otros elementos. Cauas, D. (2015).	Control de fallas activas	- Desplazamiento de fallas	mm

Nota. Se muestra la operacionalización de variables.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Trabajo de Investigación

Según Gómez (2021), en su tesis “*Investigación sobre las vibraciones generadas por voladuras en minas subterráneas*”, Universidad de los Andes. Objetivo: Analizar el impacto de las vibraciones causadas por voladuras en minas subterráneas y desarrollar estrategias para reducir estos efectos. Metodología: Monitorización de vibraciones durante las voladuras, análisis de datos sísmicos y simulaciones por computadora. Diseño: Estudio longitudinal realizado en varias minas subterráneas, con mediciones antes, durante y después de las voladuras. Muestra: Datos sísmicos y de vibración recopilados en tres minas subterráneas a lo largo de un período de 12 meses. Resumen: Se examinaron las vibraciones producidas por diferentes técnicas de voladura y sus efectos en la estructura de la mina y el entorno circundante. Conclusiones: Las técnicas de voladura controlada pueden disminuir notablemente las vibraciones, mejorando la seguridad estructural y reduciendo el impacto ambiental. El antecedente citado aporta a la presente investigación a reconocer el impacto de las vibraciones en las fallas activas producto de las voladuras.

Según Mendoza (2022), en su tesis “*Análisis y control de vibraciones en voladuras de rocas en minas a cielo abierto*”, Universidad Nacional de Ingeniería. Objetivo: Estudiar los efectos de las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto y proponer métodos para controlarlas. Metodología: Medición de vibraciones, análisis de la frecuencia y amplitud de ondas sísmicas, y modelado de impacto. Diseño: Investigación experimental con pruebas en diferentes puntos de una mina a cielo abierto y análisis comparativo de técnicas de voladura. Muestra: Datos de vibración de seis voladuras en una mina a cielo abierto y encuestas al personal sobre los efectos percibidos. Resumen: Se evaluaron diversos métodos de voladura para controlar y reducir las vibraciones, analizando sus efectos en la estabilidad de las estructuras cercanas y en la productividad de la mina. Conclusiones: La implementación de métodos de voladura optimizados puede minimizar las vibraciones, mejorando tanto la seguridad como la

eficiencia operativa. El antecedente citado aporta a la presente investigación a reconocer el impacto de las vibraciones en las fallas activas producto de las voladuras.

Según Torres (2023), en su tesis “*Impacto de las vibraciones de voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura*”, Universidad Politécnica de Madrid. Objetivo: Estudiar el impacto de las vibraciones producidas por voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura. Metodología: Análisis de estabilidad de taludes mediante modelos numéricos y medición de vibraciones durante las voladuras. Diseño: Estudio de caso en minas de roca dura con monitoreo en tiempo real de las vibraciones y análisis post-voladura. Muestra: Datos de vibración y estabilidad de taludes en cuatro minas durante un año. Resumen: Se investigaron los efectos de las vibraciones de voladuras en la estabilidad de los taludes y se desarrollaron recomendaciones para mitigar el riesgo de deslizamientos. Conclusiones: Un control adecuado de las vibraciones durante las voladuras es crucial para mantener la estabilidad de los taludes y prevenir deslizamientos peligrosos. El antecedente citado aporta a la presente investigación a reconocer el impacto de las vibraciones en las fallas activas producto de las voladuras.

Según Valencia (2024), en su tesis “*Metodologías para la reducción de vibraciones en voladuras en minería de superficie*”, Universidad de Sevilla. Objetivo: Desarrollar y evaluar métodos para reducir las vibraciones en voladuras en minas de superficie. Metodología: Implementación de técnicas alternativas de voladura, medición de vibraciones y análisis de impacto ambiental. Diseño: Investigación aplicada con pruebas en un entorno controlado y análisis comparativo de metodologías. Muestra: Datos de vibración de 10 voladuras utilizando diferentes técnicas y análisis de impacto en áreas adyacentes. Resumen: Se probaron varias metodologías para reducir las vibraciones durante las voladuras, con un enfoque en minimizar los efectos negativos en el entorno. Conclusiones: La adopción de metodologías específicas puede reducir significativamente las vibraciones y mejorar el impacto ambiental de las operaciones mineras. El antecedente citado aporta a la presente investigación a reconocer el impacto de las vibraciones en las fallas activas producto de las voladuras.

2.2. Bases Teóricas sobre el Trabajo de Investigación

2.2.1. Minería

La minería consiste en la extracción económica de minerales valiosos u otros materiales geológicos de la Tierra. La ingeniería de minas abarca todas las etapas de esta actividad, incluyendo la exploración y evaluación de yacimientos minerales, la extracción, el procesamiento, el transporte y la rehabilitación del terreno impactado. (Herrera, 2017).

2.2.2. Minería Superficial

La minería superficial es un método de extracción de minerales ubicado cerca de la superficie terrestre. Este procedimiento consiste en retirar las capas superiores de tierra y roca para llegar a los depósitos minerales debajo. Entre las técnicas de minería superficial se encuentran la minería a cielo abierto, las canteras y la minería de contorno, utilizadas frecuentemente para extraer minerales como carbón, hierro, cobre y oro. La ventaja principal de este tipo de minería es su capacidad para extraer grandes volúmenes de mineral de manera eficiente y rentable. Sin embargo, también puede tener un impacto ambiental considerable, como la alteración del paisaje y la producción de residuos (Herrera, 2017).

2.2.3. Perforación

Se define como el proceso de hacer un agujero o cavidad en el suelo, roca o cualquier material sólido utilizando herramientas específicas como brocas y taladros. Este proceso es fundamental en diversas industrias como la minería, la construcción, la exploración geológica y la extracción de recursos naturales.

No hay un autor específico para esta definición, ya que es un término ampliamente reconocido y utilizado en diversos campos de la ingeniería, la geología y otras disciplinas relacionadas con la extracción y exploración de recursos naturales (Montoya, 2018).

2.2.4. Voladura de Rocas

Se define como el proceso controlado y sistemático de fragmentación de rocas mediante el uso de explosivos. Esta técnica se utiliza principalmente en la minería, la

construcción de carreteras y en proyectos de ingeniería civil donde se requiere la fragmentación de grandes volúmenes de roca para facilitar su extracción o demolición.

No hay un autor específico para esta definición, ya que es un término técnico bien establecido y utilizado ampliamente en la industria de la minería y la construcción (Montoya, 2018).

2.2.5. *Factor de Potencia*

Puede referirse a la eficiencia con la que la energía de los explosivos se transfiere y se utiliza para fragmentar la roca objetivo durante la voladura. Este factor se puede calcular como la relación entre la energía liberada efectivamente para la fragmentación de roca (energía útil) y la energía total suministrada por los explosivos durante la voladura (Montoya, 2018).

2.2.6. *Fragmentación*

Se refiere al proceso de reducción del tamaño de las rocas grandes en fragmentos más pequeños mediante el uso de técnicas como la perforación y voladura, trituración o molienda. Esta reducción del tamaño es fundamental para la extracción eficiente y el procesamiento posterior del mineral (Montoya, 2018).

2.2.7. *Costo de los Explosivos*

El precio de los explosivos utilizados en la voladura, que puede variar según el tipo y la cantidad requerida para fragmentar la roca objetivo de manera efectiva (Montoya, 2018).

2.2.8. *Explosivo*

Se define como un material químico o mezcla de materiales que, cuando se activa adecuadamente, produce una liberación rápida de energía en forma de gases calientes y presión. Esta liberación de energía se utiliza para fragmentar rocas y facilitar la extracción de minerales de manera eficiente (Montoya, 2018).

2.2.9. ANFO

Es un explosivo de baja sensibilidad y alto poder de fragmentación, utilizado principalmente en voladuras a cielo abierto y subterráneo. Se caracteriza por ser relativamente seguro de manejar y transportar, así como por su eficiencia en la fragmentación de rocas. La proporción típica es aproximadamente 94 % de nitrato de amonio y 6 % de diésel (por peso), lo que lo hace económico y fácil de preparar en el lugar de la operación (Montoya, 2018).

2.2.10. Emulsión

Se refiere a una mezcla de nitrato de amonio y un combustible líquido (generalmente un aceite) que se utiliza como un explosivo para realizar voladuras controladas y eficientes en operaciones mineras (Montoya, 2018).

2.2.11. Heavy ANFO

Es un tipo de explosivo que consiste en una mezcla de nitrato de amonio (NH_4NO_3) como oxidante y un aceite combustible (como el diésel) como combustible. La proporción exacta de nitrato de amonio y aceite combustible puede variar, pero generalmente contiene una mayor proporción de combustible en comparación con el ANFO estándar (Montoya, 2018).

2.2.12. Vibraciones

Las vibraciones en voladura son ondas sísmicas producidas por explosiones controladas en la minería y la construcción. Estas vibraciones se difunden a través del suelo y las rocas circundantes, y su intensidad y alcance dependen de la cantidad de explosivos utilizados, la técnica de voladura aplicada y las características geológicas del área.

Se miden y analizan las vibraciones en voladura para asegurar la seguridad de las estructuras cercanas y minimizar el impacto ambiental. El control adecuado de estas vibraciones es crucial para evitar daños en edificaciones e infraestructuras y para reducir las molestias a las comunidades vecinas. Además, la gestión de las vibraciones es fundamental para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad en las operaciones mineras y de construcción (Romero, 2016).

2.2.13. Fallas activas

Las fallas activas son fracturas en la corteza terrestre que han experimentado movimiento geológico reciente y tienen la posibilidad de desplazarse nuevamente en el futuro. Estas fallas están vinculadas a la liberación de energía que se manifiesta en forma de terremotos. La actividad de una falla se determina a partir de su historial sísmico, desplazamientos geológicos previos y otros indicadores geofísicos.

El análisis de fallas activas es crucial para la sismología y la ingeniería geotécnica, ya que ayuda a identificar áreas con riesgo sísmico, diseñar edificaciones que resistan terremotos y planificar el uso del suelo de manera segura (Romero, 2016).

2.2.14. Estabilidad de taludes

La estabilidad de taludes se refiere a la habilidad de una pendiente o talud para conservar su integridad sin experimentar deslizamientos o colapsos. Un talud puede ser una inclinación natural, como las laderas de montañas, o una estructura artificial, como las excavaciones mineras o las paredes de presas. Mantener la estabilidad de un talud es esencial para evitar deslizamientos de tierra que puedan dañar estructuras cercanas, poner en peligro a las personas y comprometer la seguridad del terreno.

La estabilidad de un talud está influenciada por múltiples factores, tales como la inclinación del terreno, las características y cohesión del suelo o roca, la presencia de agua, las cargas aplicadas y las condiciones ambientales. Para evaluar la estabilidad, se utilizan técnicas geotécnicas, modelado numérico y simulaciones que permiten anticipar cómo se comportará el talud bajo diferentes condiciones. El objetivo es desarrollar estrategias correctivas o preventivas para garantizar que el talud se mantenga estable y seguro con el tiempo (Romero, 2016).

2.2.15. Prevención de Deslizamientos

La prevención de deslizamientos en minería a tajo abierto está directamente relacionada con el tipo de terreno y las características geomecánicas del macizo rocoso. En el caso de depósitos tipo pórfido cuprífero, como el presente estudio, el terreno está conformado principalmente por rocas ígneas intrusivas, brechas hidrotermales, rocas volcánicas y zonas con presencia de yeso o anhidrita, las cuales presentan distintos

comportamientos mecánicos frente a cargas estáticas y dinámicas. Estas litologías pueden encontrarse intensamente fracturadas y atravesadas por sistemas de fallas activas, lo que genera planos de debilidad estructural susceptibles a reactivación cuando se aplican esfuerzos adicionales, como los inducidos por voladuras (Romero, 2016).

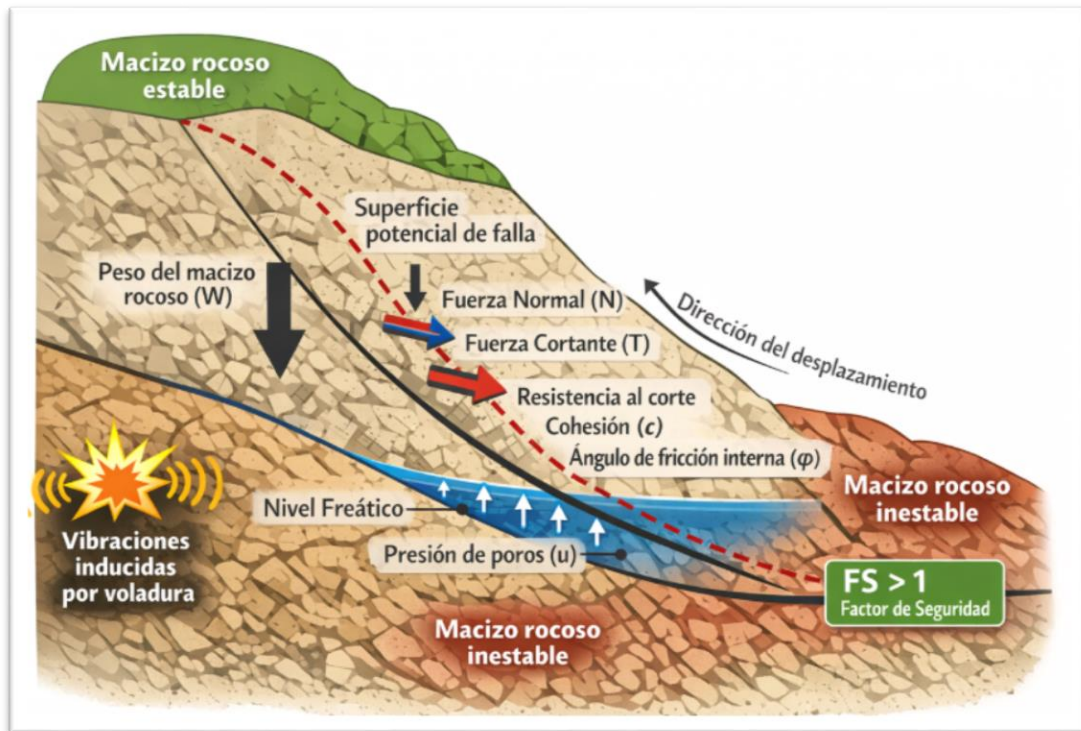
Desde el punto de vista geomecánico, el terreno puede clasificarse en macizos competentes (rocas intrusivas relativamente masivas y de alta resistencia) y macizos alterados o brechados (zonas con menor cohesión, mayor fracturamiento y posible presencia de rellenos arcillosos o sulfatos). En sectores donde predominan brechas o zonas de alteración hidrotermal, el ángulo de fricción interna y la cohesión pueden disminuir considerablemente, reduciendo el factor de seguridad del talud. Además, la presencia de agua subterránea incrementa la presión de poros, disminuyendo la resistencia efectiva del material y aumentando la probabilidad de deslizamientos (Hoek & Brown, 2019).

En terrenos con estructuras tectónicas activas, como fallas o diaclasas persistentes, los mecanismos de falla más comunes en minería superficial son la falla plana, la falla en cuña y la falla circular. La orientación de estas discontinuidades respecto a la geometría del talud determina el modo de inestabilidad predominante. Cuando las vibraciones inducidas por voladura actúan sobre estos planos estructurales, pueden producir una reducción temporal del esfuerzo normal efectivo, facilitando desplazamientos diferenciales o micro-movimientos progresivos que, con el tiempo, pueden evolucionar hacia deslizamientos mayores (Hustrulid & Kuchta, 2006).

Por ello, la prevención de deslizamientos en este tipo de terreno requiere un enfoque integral que incluya: (i) caracterización geomecánica detallada mediante mapeo estructural y clasificación RMR o GSI, (ii) monitoreo continuo de desplazamientos con extensómetros y radar de taludes, (iii) control del drenaje para reducir presión de poros y (iv) optimización del diseño de voladura para limitar las vibraciones en zonas cercanas a fallas activas. La integración de estos elementos permite mantener factores de seguridad adecuados y garantizar la estabilidad de los taludes en condiciones operativas dinámicas.

Figura 1

Fuerzas actuantes en la estabilidad de talud



Nota. Esquema conceptual de las fuerzas actuantes en la estabilidad de un talud en minería a tajo abierto, donde se representan el peso del macizo rocoso (W), la fuerza normal (N), la fuerza cortante (T), la resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna), la presión de poros y la influencia de vibraciones inducidas por voladura sobre la superficie potencial de falla. Elaboración propia.

2.2.16. Caracterización del Macizo Rocosó

La clasificación litológica está determinada por la presencia de yeso anhidrita, el cual se caracteriza por presentar una configuración irregular en la zona del techo o tope. Este material contribuye favorablemente al macizo rocoso, ya que actúa como agente cementante dentro de las fracturas, incrementando la cohesión, solidez y estabilidad del conjunto rocoso. La siguiente clasificación, configura las rocas presentes en una Mina Superficial en rocas o brechas con yeso, brechas sin yeso, rocas volcánicas y rocas intrusitas, esta última, catalogada en dos modalidades. Existen muchas formas de efectuar una clasificación del macizo rocoso, en todas ellas, prima las agrupaciones por semejanza en litologías y propiedades volumétricas y geomecánicas, así como también el hecho de pertenecer a un mismo dominio estructura. La zonificación geomecánica de una Mina Superficial está basada en la caracterización de la masa rocosa, especialmente las

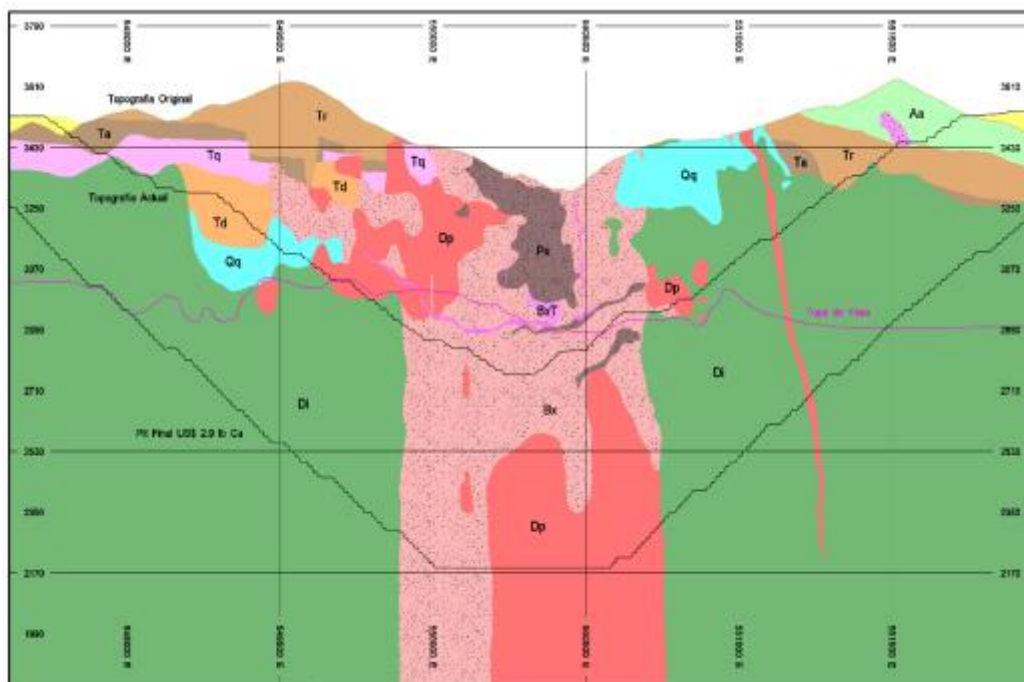
características estructurales establecidas a partir de un mapeo geotécnico; a fin de conocer la calidad de la masa rocosa, determinada por la clasificación geomecánica (RMR); planos topográficos y geológicos proporcionadas por una Mina Superficial con sus respectivas observaciones in situ realizadas durante el mapeo geotécnico (Mina Superficial, 2018).

2.2.17. Geología Estructural

Una Mina Superficial corresponde a un yacimiento de tipo pórfido cuprífero en el que la mineralización se encuentra distribuida de manera diseminada, principalmente en forma de sulfuros finos y vetillas delgadas. Este tipo de depósito presenta un fracturamiento poco continuo y de baja persistencia, desarrollado dentro de un macizo rocoso compuesto por rocas ígneas de naturaleza acida a intermedia. Estructuralmente, el depósito está ubicado en una chimenea volcánica del tipo diatrema, donde la mineralización del depósito ha sido posible por la existencia de una zona de debilitamiento que permitió el paso de soluciones mineralizadas (Romero, 2016).

Figura 2

Sección geológica



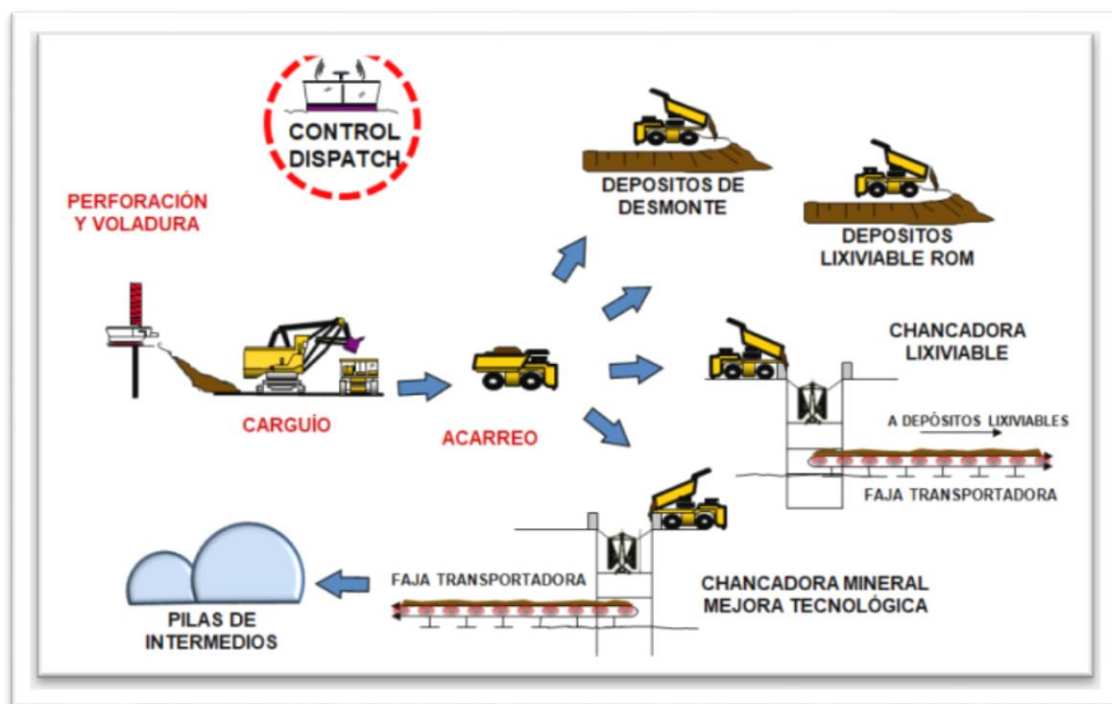
Nota: Mina Superficial. (2018). Modelo geológico de una Mina Superficial. Dirección de Geología – Departamento Técnico de Geología. Informe interno.

2.2.18. Operaciones Unitarias

El desarrollo adecuado de las operaciones unitarias en la mina se sustenta en la disponibilidad de información técnica confiable que respalde los procedimientos de trabajo. Esta información proviene de fuentes especializadas y permite ejecutar las actividades bajo estándares óptimos de seguridad, aplicación de tecnología adecuada y eficiencia en los procesos productivos. Asimismo, se complementa con la experiencia del personal responsable de la ejecución de las labores operativas.

Figura 3

Proceso operaciones mina



Nota: Mina Superficial. (2023). Flujograma operativo del proceso minero: Perforación, acarreo y chancado en una Mina Superficial. Presentación interna, Departamento de Operaciones Mina.

2.2.19. Perforación

La perforación es la primera operación unitaria dentro del proceso de explotación a tajo abierto, y consiste en la elaboración de taladros en el macizo rocoso siguiendo una disposición y geometría previamente diseñada. Estos orificios permiten alojar posteriormente la carga explosiva y los sistemas de iniciación utilizados en la voladura.

En el caso de una mina superficial, este proceso se ejecuta mediante equipos de perforación eléctricos para labores de producción, mientras que para actividades de pre-corte se emplean perforadoras de accionamiento mecánico con motor diésel. Los equipos eléctricos trabajan con una potencia cercana a los 7000 W, en tanto que los de pre-corte operan con combustible diésel.

El sistema de perforación eléctrica está compuesto por varios elementos que trabajan de manera integrada: la perforadora, que transforma la energía en movimiento mecánico; la columna de perforación, encargada de transmitir dicha energía hasta la broca tricónica; y el sistema de fluido de barrido, que permite la evacuación del detrito y mantiene limpio el taladro durante la perforación.

2.2.20. Perforación de Producción

La perforación de producción corresponde al conjunto de taladros ejecutados con la finalidad de facilitar la fragmentación del macizo rocoso mediante voladura, permitiendo que el material resultante pueda ser posteriormente cargado por la pala y transportado hacia las tolvas de los volquetes, su diseño se establece considerando las condiciones geomecánicas y estructurales del macizo rocoso. A continuación, se detallan las siguientes características:

✓ Diámetro de perforación: 11 y 12 $\frac{1}{4}$ "

✓ Profundidad del taladro: 15 m

✓ Sobre perforación: de 1 a 2 m

✓ Malla de perforación: configuración Triangular equilátera de 6,5 a 11 m.

Al finalizar el año 2022, se registró una velocidad promedio de perforación de 22,40 m/hr, alcanzándose un total de 1 518 608 metros perforados. Para el año 2023, bajo condiciones operativas similares en cuanto a costos horarios y considerando la baja de una perforadora en el año 2022, se estimó una mejora del rendimiento cercana al 10% en la producción de metros perforados.

Figura 4

Perforación en tajo



Nota: Elaboración propia. (2023). Equipo de perforación rotativa PH1 en operación – una Mina Superficial [Fotografía]. Trabajo de campo.

2.2.21. Voladura

La voladura es la operación destinada a la fragmentación del macizo rocoso mediante la utilización de cargas explosivas introducidas en taladros perforados previamente, con el fin de facilitar las etapas posteriores de carguío y acarreo. Este proceso se basa en la liberación de energía en forma de gases durante la detonación, la cual genera la ruptura y fragmentación de la roca confinada dentro de los barrenos.

El procedimiento incluye el carguío de los taladros mediante camiones fabrica, los cuales transportan y dosifican explosivos como ANFO y emulsiones gasificadas, comúnmente conocidos en el mercado como QUANTEX HA-73. La cantidad de explosivo empleada varía en función de la ubicación del taladro (material de desmonte o mineral destinado a chancado), las características geomecánicas de la roca y su posición

dentro del diseño de la malla de perforación, ya sea cercana a la cresta o al fondo del taladro.

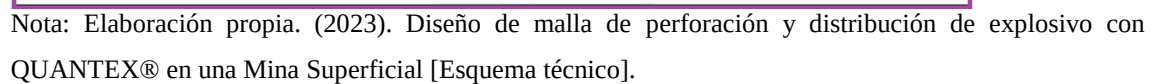
El QUANTEX HA-73 o Heavy ANFO corresponde a un explosivo gasificado cuya matriz incorpora microburbujas que actúan como puntos de iniciación de reacción (hot spots), permitiendo modificar su densidad y propiedades energéticas. Estas características dependen directamente de la dosificación del agente gasificante incorporado durante su preparación.

En el presente estudio se analiza el uso de ANFO pesado gasificable en proporción aproximada de 70% emulsión y 30% ANFO. Este tipo de explosivo presenta ventajas económicas frente a formulaciones anteriores, como el HA-55, debido a su menor consumo lineal y a su capacidad de expansión, lo que permite alcanzar mayores alturas de carga de taladro, aproximadamente entre 0,7 m y 1,0 m adicionales.

Una vez realizada la carga, los taladros se detonan siguiendo un diseño previamente establecido de malla de perforación, el cual contempla una secuencia específica de iniciación. Este proceso se controla mediante parámetros como el factor de carga, la vibración generada y la proyección de fragmentos (fly rock), con el objetivo de garantizar condiciones seguras y eficientes de voladura.

Finalmente, la eficiencia del proceso de voladura impacta directamente en la productividad de la operación minera, al mejorar la fragmentación del material y optimizar el rendimiento del carguío y transporte, incrementando así el tonelaje movido por hora (t/h).

Distribución de carga



En los trabajos de voladura, es fundamental considerar el proceso de carguío y cebado de los taladros, el cual varía según el diámetro de perforación en superficie. Asimismo, se debe prestar especial atención a la correcta ubicación del detonador y del cordón detonante dentro del sistema de iniciación. De igual manera, resulta importante la disposición adecuada de elementos como el taco, la carga de columna, la carga de fondo y el cebo, ya que su organización influye directamente en el desempeño del proceso (EXSA, 2020).

20

mientras que la carga de fondo se ubica en la parte inferior del taladro, contribuyendo al inicio de la rotura de la roca. Finalmente, el cebo, asociado al detonador, es el encargado de iniciar la reacción explosiva. La correcta interacción de estos componentes permite lograr una voladura eficiente y controlada.

2.2.23. Explosivos y Accesorios Utilizados Actualmente en Mina

En las operaciones de voladura de producción se emplea principalmente el booster como agente iniciador. Asimismo, se utilizan accesorios de voladura como detonadores electrónicos y detonadores no electrónicos, estos últimos como sistema de respaldo (back up) para garantizar la continuidad y seguridad del proceso. Se considera explosivo a la mezcla de agentes, como el nitrato de amonio, la emulsión, el sensibilizante el nitrito de sodio que es el agente que gasifica, y hace que la mezcla esponje, el booster que va a un metro de la columna explosiva junto con los accesorios para iniciar la voladura (Lopez et al., 2004).

2.2.24. Burden

“Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de taladros en una voladura” (Lara, 2013).

2.2.25. Espaciamiento

“Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo detonador o con detonadores diferentes y mayores en la misma fila” (Lara, 2013).

2.2.26. Malla

El diseño de las mallas de voladura es el resultado de múltiples ensayos y ajustes basados en modelos matemáticos. Por ello, resulta importante conocer previamente la granulometría esperada del material fragmentado en la pila de escombros, ya que esta información permite optimizar el diseño y la eficiencia del proceso de voladura. Así mismo establece que el objetivo de una voladura, es aquella en la que se buscan resultados óptimos en la fragmentación y un desplazamiento controlado del material. (Torres, 2017)

Para lograr este objetivo y evaluar el correcto rendimiento de una voladura, se deben tener en cuenta tres factores fundamentales, que son claves para un correcto diseño y control de las voladuras, las cuales son:

- a) Una correcta cantidad de energía
- b) Una correcta distribución de energía
- c) Un correcto confinamiento de energía. (Linares, 2018)

2.2.27. Fragmentación

La fragmentación de rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción. (Torres, 2017)

Este mecanismo aún no está plenamente definido, existiendo varias teorías que tratan de explicarlo entre las que mencionamos a:

- Teoría de reflexión (ondas de tensión reflejadas en una cara libre)
- Teoría de expansión de gases
- Teoría de ruptura flexural (por expansión de gases)
- Teoría de torque (torsión) o de cizallamiento
- Teoría de caracterización
- Teoría de energía de los frentes de onda de compresión y tensión
- Teoría de liberación súbita de cargas. (Valenzuela, 2013)

2.2.28. Definición del índice P80 en fragmentación

“Es el índice que señala el fragmento de mayor tamaño, del cual el 80 % de los demás fragmentos de la voladura se encuentran por debajo de su medida, y el 20% restante lo supera en tamaño” (Valenzuela, 2013).

2.2.29. Split on line

Split-Online corresponde a una versión del Sistema Split orientada al monitoreo continuo de la fragmentación de roca en operaciones mineras donde es viable la instalación permanente de cámaras de video. Este Sistema está diseñado para trabajar en puntos estratégicos del proceso productivo, tales como palas de carguío, tolvas (hoppers), zonas de descarga de vagones, fajas transportadoras asociadas a trituradoras primarias, así como en correas que alimentan molinos SAG, AG o de rodillos. De igual manera, en instalaciones de chancado primario que cuentan con rampas de descarga directa, es posible ubicar cámaras de manera fija para el registro permanente del material fragmentado. En el caso del transporte de mineral o desmonte mediante camiones, las cámaras pueden instalarse en accesos o rutas de acarreo, especialmente en puntos de descarga hacia pilas de lixiviación o botaderos. El Sistema Split-online opera de forma ininterrumpida y es capaz de capturar imágenes provenientes de una o varias cámaras en intervalos definidos por el usuario, o bien mediante señales externas de activación, como podría ser el evento de descarga de un camión de acarreo. A partir de cada imagen registrada, el sistema realiza el procedimiento digital para estimar la distribución granulométrica del material, generando una curva completa de tamaños de fragmentos. Asimismo, calcula el porcentaje de material pasante en distintos intervalos de tamaño, comúnmente expresados en rangos de 10% dentro del intervalo aproximado entre 10% y 90%. El software También presenta resultados mediante gráficos actualizados de la última distribución calculada por cada cámara, así como tendencias del P80 en un periodo de 24 horas. Adicionalmente, proporciona tablas con la curva granulométrica y valores promedio correspondientes a intervalos de tiempo definidos. Esta información puede ser transmitida a sistemas externos mediante señales industriales como 4-20 mA o redes de comunicación. Asimismo, el Sistema puede ser accedido de forma remota a través de modem o conexión a internet, permitiendo al usuario visualizar la interfaz, controlar el software, supervisar la calidad de las imágenes y transferir datos hacia ubicaciones remotas. (Girdner, K, Kemeny, J., Srikant, A., and R. McGill. 1996).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y Nivel de la Investigación

3.1.1. Método de la Investigación

En el desarrollo de la presente investigación se empleará el método cuantitativo, ya que se trabajará con información expresada en valores numéricos que permitirá realizar comparaciones y mediciones. Asimismo, mediante estos datos será posible efectuar análisis descriptivos e inferenciales con la finalidad de verificar las hipótesis planteadas.

3.1.2. Tipo de la Investigación

La presente investigación será de tipo aplicada, puesto que estará orientada a la obtención de conocimientos relacionados con situaciones del contexto real, buscando su utilidad práctica en el entorno de estudio.

3.2. Nivel de la Investigación

El presente estudio corresponde a un nivel de investigación relacional, dado que se realizará la relación existente entre los resultados obtenidos de las voladuras correspondientes al segundo y tercer trimestre del año 2023.

3.3. Diseño de la Investigación

El estudio adopta un enfoque de tipo longitudinal, debido a que se realizará la comparación de los registros de vibración generados por las voladuras del segundo trimestre con datos del tercer trimestre del 2023, a fin de obtener una comparación del control de desplazamiento de las fallas activas producto de las voladuras.

Lograr el control del desplazamiento de las fallas activas, esto conlleva la mejora de las voladuras de rocas.

La investigación será cuasi experimental, debido a que se manipulará la variable independiente al controlar las vibraciones y observar el comportamiento de la variable dependiente.

3.4. Población y Muestra

3.4.1. Población

Para el presente proyecto de investigación, la población estará conformada por las voladuras ejecutadas durante el año 2023.

3.4.2. Muestra

Como muestra se analizarán las voladuras realizadas en la fase 8 E de los niveles 3295, 3310, 3325 de 6 meses:

- Del 01-04-2023 al 30-06-2023. (Antes de iniciar la prueba)
- Del 01-07-2023 al 30-09-2023. (Después de iniciar la prueba)

La selección de muestra considera lo siguiente:

La técnica de muestreo: No probabilística

Método: censal.

3.5. Equipos y materiales

- Split on line
- Reporte de P80 por hora
- Reporte de P80 de palas
- Reporte de P80 de descarga en chancadora
- Reporte de voladura
- Sismógrafo
- Extensómetro
- Detonadores electrónicos.

3.6. Procedimientos de las Pruebas Experimentales

El procedimiento de las pruebas experimentales para el proyecto "Gestión del Control de Vibraciones en Fallas Activas al Implementar Mejoras en la Voladura de Rocas en una Mina Superficial" se desarrolla en las siguientes fases:

- **Identificación de las fallas activas y áreas sensibles:** En esta fase, se realiza una inspección geotécnica detallada para identificar las fallas activas dentro de la mina superficial. Se documentan las características geológicas del terreno, el tamaño y la orientación de las fallas, y se determinan las áreas de mayor riesgo geotécnico.
- **Diseño de las voladuras experimentales:** Se establecen diferentes configuraciones de voladura, ajustando variables como el diámetro de los taladros, el espaciamiento, la cantidad de explosivos y el tipo de carga utilizada. Cada diseño se orienta a reducir las vibraciones generadas, considerando la cercanía a las fallas.
- **Monitoreo de vibraciones:** Durante las pruebas de voladura, se instalan sensores sismográficos alrededor de las zonas críticas para registrar los niveles de vibración. Estos sensores permiten medir la intensidad y frecuencia de las vibraciones, así como su propagación en el terreno. Se monitorea cómo las vibraciones afectan las fallas identificadas.
- **Análisis de datos y ajuste de parámetros:** Los datos recopilados se analizan para evaluar la efectividad de las voladuras experimentales en la reducción de vibraciones. Se ajustan los parámetros de voladura en función de los resultados obtenidos, optimizando el diseño de las mismas para minimizar los impactos en las fallas.
- **Informe final y recomendaciones:** Una vez completadas las pruebas, se elabora un informe detallado que documenta los hallazgos, las configuraciones de voladura más efectivas y las recomendaciones para la gestión de vibraciones en la mina.

3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.7.1. Para la Variable Independiente:

Fuentes para recolección de información: la información a recopilar provendrá de fuentes internas de la operación minera. Se emplearán registros relacionados con vibraciones, desplazamientos en fallas, factor de potencia, grado de fragmentación del material y costos asociados al proceso de voladura.

3.7.2. Para la Variable Dependiente:

Técnicas para recolección de información: para la implementación del control de fallas, se revisará los desplazamientos de las fallas activas del tercer trimestre del año 2023.

3.8. Técnicas para el Procesamiento y Análisis de Datos

Los datos recopilados serán procesados y organizados en tablas y gráficos, los cuales permitirán realizar un análisis estadístico descriptivo acompañado de su correspondiente interpretación.

Con el fin de evaluar la relación entre los desplazamientos registrados en las fallas activas antes y después de la implementación del control, el tratamiento de la información se realizará mediante el Software SPSS versión 26, utilizado como herramienta de análisis estadístico. Asimismo, para la contrastación de hipótesis en muestras relacionadas, se aplicará la prueba de Wilcoxon (T de Wilcoxon).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Descripción de las pruebas experimentales

La optimización de la voladura será aplicada durante el tercer trimestre con la finalidad de mejorar la fragmentación del material. Un adecuado control del factor potencia permitirá que el mineral presente un tamaño más favorable para el proceso de trituración, disminuyendo el esfuerzo operativo de los equipos y, en consecuencia, el consumo energético por hora. De igual manera, los parámetros de voladura serán modificados según los resultados obtenidos, buscando incrementar la eficiencia operativa y el nivel de producción.

Tabla 2

Parámetros del segundo trimestre

Mes	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Mes 1	5 815,37	0,69	11,5	0,550	29,7
Mes 2	5 809,55	0,69	11,5	0,549	29,8
Mes 3	5 806,10	0,69	11,5	0,550	29,6
Total	5 810,33	0,69	11,5	0,550	29,7

Nota. Se muestra los diferentes parámetros del segundo trimestre.

4.2. Aplicación del método Kuz-Ram en el tercer trimestre

Para aplicar el modelo Kuz-Ram en el tercer trimestre se consideró la condición optimizada de voladura, tomando como referencia los resultados operativos obtenidos: P80 = 8.1 pulgadas, factor de potencia = 0,516 kg/t, vibración = 18,4 mm/s, producción = 6 371,86 t/h y costo de voladura = 0,62 USD/t. Asimismo, se asumió una reducción de la malla de perforación respecto al segundo trimestre, con la finalidad de mejorar la

distribución de energía, controlar la fragmentación y reducir la transmisión de vibraciones hacia zonas de falla.

El yacimiento de una Mina Superficial corresponde a un pórfido de cobre-molibdeno ubicado en Moquegua, operado por una Mina Superficial, con unidades mineralizadas principales BA, LP y BLP, además de alteraciones potásicas, fílicas y argílicas, condiciones que influyen en la respuesta del macizo rocoso frente a la voladura. Para efectos del cálculo se asumió una densidad de roca de 2,65 t/m³, un macizo rocoso de calidad media a competente y un factor de roca calibrado $A = 4,92$, debido a que el modelo fue ajustado con el P80 real obtenido en campo durante el tercer trimestre.

Tabla 3

Parámetros del tercer trimestre

Parámetro	Símbolo	Valor
Altura de banco	H	15 m
Diámetro de taladro	D	12 1/4" = 0,311 m
Burden optimizado	B	8.0 m
Espaciamiento optimizado	S	9.0 m
Densidad de roca	ρ	2,65 t/m ³
Factor de potencia	PF	0,516 kg/t
Carga por taladro	Q	808 kg
Factor de roca calibrado	A	4.92
Índice de uniformidad	n	1.49
P80 real tercer trimestre	P80	8,1 pulg

Nota. Se muestra los diferentes parámetros del tercer trimestre.

4.3. Predicción de la Fragmentación mediante Kuz-Ram

4.3.1. Factor de Potencia Volumétrico

$$K = PF \times \rho$$

$$K = 0,516 \times 2.65 = 1,367 \text{ kg/m}^3$$

4.3.2. *Tamaño Medio de Fragmentación, Modelo Kuznetsov*

$$X_{50} = A \times K^{-0.8} \times Q^{1/6} \times \left(\frac{115}{RWS} \right)^{19/30} \quad [01]$$

Donde:

- X_{50} : tamaño medio de fragmentación, en cm
- A: factor de roca
- K: factor de potencia volumétrico, kg/m³
- Q: carga de explosivo por taladro o por retardo, kg
- RWS: potencia relativa del explosivo, asumida como 115 para ANFO pesado gasificable

Aplicando:

$$X_{50} = 11,69 \text{ cm}$$

4.3.3. *Índice de Uniformidad de Rosin-Rammler*

$$n = \left(2.2 - \frac{14B}{D} \right) \times \left(1 - \frac{W}{B} \right) \times \left(1 + \frac{S/B - 1}{2} \right) \quad [02]$$

Para el caso optimizado se asumió un buen control de perforación, con desviación reducida, obteniéndose:

$$n=1,49$$

Este valor indica una fragmentación más uniforme, asociada a una mejor distribución de energía y a la reducción de sobredimensionados.

4.3.4. Cálculo del P80 mediante Rosin-Rammler

$$P_{80} = X_{50} \times \left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)} \right)^{1/n} \quad [03]$$

$$P_{80} = 11.69 \times \left(\frac{1.609}{0.693} \right)^{1/1.49}$$

$$P_{80} = 20.57 \text{ cm}$$

$$P_{80} = \frac{20.57}{2.54} = 8.1 \text{ pulgadas}$$

La aplicación del modelo Kuz-Ram permitió estimar un P80 de 8,1 pulgadas para el tercer trimestre, valor que coincide con el resultado obtenido en campo. Esto evidencia que la reducción de la malla, junto con la optimización del factor de potencia, la mejor distribución de la carga explosiva y el control de la secuencia de detonación, permitió obtener una fragmentación más fina y uniforme.

En comparación con el segundo trimestre, donde el P80 fue de 11,5 pulgadas, el tercer trimestre logró una reducción a 8.1 pulgadas, equivalente a una mejora del 29,32 %. Esta mejora favoreció el incremento de la producción de 5 810,34 t/h a 6 371,86 t/h, al mismo tiempo que redujo el costo unitario de voladura de 0.69 a 0.62 USD/t y las vibraciones de 29,7 a 18,4 mm/s.

En consecuencia, el modelo Kuz-Ram valida técnicamente que la mejora de la malla y el control de los parámetros de voladura contribuyeron a optimizar la fragmentación, mejorar la eficiencia operativa y reducir el impacto vibracional sobre las zonas de falla activa.

4.4. Parámetros de Perforación y Voladura Segundo vs Tercer Trimestre

Para el análisis comparativo se consideraron los parámetros operativos de perforación y voladura en ambos periodos, manteniendo constantes las condiciones geológicas (tipo de roca de una Mina Superficial – pórfido cuprífero), altura de banco y diámetro de perforación, y modificando la geometría de malla y distribución de carga en el tercer trimestre.

Tabla 4*Parámetros Segundo vs Tercer Trimestre*

Parámetro	Símbolo	Segundo Trimestre	Tercer Trimestre	Variación
Altura de banco	H (m)	15	15	=
Diámetro de taladro	D (mm)	311 mm (12 1/4")	311 mm	=
Burden	B (m)	9	8	↓ 11,1 %
Espaciamiento	S (m)	10	9	↓ 10,0 %
Relación S/B	S/B	1,11	1,13	≈
Taco	T (m)	4	4,5	↑ 12,5 %
Subperforación	J (m)	1,5	1,5	=
Longitud de carga	Lc (m)	9,5	8,5	↓
Volumen por taladro	V (m³)	1350	1080	↓ 20 %
Tonelaje por taladro	Qr (t)	3577	2862	↓
Carga por taladro	Q (kg)	913	808	↓ 11,5 %
Factor de potencia	PF (kg/t)	0,55	0,516	↓ 6,17 %
Factor volumétrico	K (kg/m³)	1,458	1,367	↓
P80	(pulg)	11,5	8,1	↓ 29,32 %
Vibración (PPV)	(mm/s)	29,7	18,4	↓ 38,08 %

Nota. Se muestra los diferentes parámetros del segundo vs el tercer trimestre.

Se observa que en el tercer trimestre se realizó una reducción controlada de la malla de perforación, disminuyendo el burden y espaciamiento, lo cual permitió mejorar la distribución de energía explosiva dentro del macizo rocoso. Esta optimización generó una fragmentación más eficiente, reduciendo el tamaño P80 de 11,5 a 8,1 pulgadas.

Asimismo, la reducción del volumen de roca por taladro y la disminución de la carga explosiva permitieron optimizar el consumo energético, reflejado en la disminución del factor de potencia de 0,550 a 0,516 kg/t. A pesar de utilizar menor carga explosiva, la mejor distribución de la energía generó una mayor eficiencia de ruptura.

Por otro lado, el incremento del taco contribuyó a mejorar el confinamiento de gases, evitando pérdidas de energía hacia la atmósfera y favoreciendo la fragmentación interna del macizo. Este aspecto es clave en el control de vibraciones, ya que reduce la energía no aprovechada que se transmite como onda sísmica.

En términos de impacto geomecánico, la optimización del diseño de voladura permitió reducir las vibraciones de 29,7 mm/s a 18,4 mm/s, trasladando el comportamiento desde una zona de alerta hacia una zona segura según la norma DIN

4150-3. Esto evidencia un mejor control de la interacción entre la voladura y las fallas activas presentes en el macizo rocoso.

La optimización de los parámetros de perforación y voladura en el tercer trimestre permitió:

- Mejorar la fragmentación (↓ P80 29,32 %)
- Reducir el consumo específico (↓ PF 6,17 %)
- Disminuir significativamente las vibraciones (↓ 38,08 %)
- Incrementar la eficiencia operativa (↑ producción y ↓ costos)

Estos resultados demuestran que una adecuada redistribución de la energía explosiva es más eficiente que el incremento de carga, validando el diseño optimizado mediante el modelo Kuz-Ram y su correlación con los resultados de campo.

Tabla 5

Parámetros del tercer trimestre

Mes	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Mes 1	6 359,23	0,62	8,1	0,515	18,4
Mes 2	6 381,58	0,62	8,1	0,516	18,4
Mes 3	6 374,77	0,63	8,1	0,517	18,4
Total	6 371,83	0,62	8,1	0,516	18,4

Nota. Se muestra los diferentes parámetros del tercer trimestre.

4.5. Resultados Respecto a los Objetivos

4.5.1. Resultado Respecto al Objetivo General

En relación con el objetivo general, orientado a monitorear las fallas activas mediante el control de vibraciones a través de la implementación de mejoras en la voladura de rocas, se evidenció que la optimización de los parámetros de diseño permitió reducir significativamente la velocidad pico de partícula (PPV) de 29,7 mm/s en el segundo trimestre a 18,4 mm/s en el tercer trimestre, lo que representa una disminución del 38,08 %.

Este resultado permitió trasladar el comportamiento vibracional desde una zona de alerta hacia una zona segura, según los criterios de la norma DIN 4150-3, evidenciando un adecuado control de la energía liberada en zonas cercanas a fallas activas. En consecuencia, se logró monitorear indirectamente la interacción entre la voladura y las estructuras geológicas, reduciendo el riesgo de reactivación de discontinuidades y contribuyendo a la estabilidad del macizo rocoso.

4.5.2. Resultados Respecto a los Objetivos Específicos 1

En relación con el primer objetivo específico, se determinó que la reducción de vibraciones tuvo una influencia directa en la mejora de la fragmentación del material. Como resultado de la optimización del diseño de voladura, el tamaño de fragmentación P80 se redujo de 11,5 pulgadas en el segundo trimestre a 8,1 pulgadas en el tercer trimestre, lo que representa una mejora del 29,32 %.

Esta mejora se atribuye a una mejor distribución de la energía explosiva dentro del macizo rocoso, logrando una fragmentación más uniforme y eficiente. Asimismo, la disminución de vibraciones evitó la disipación de energía en forma de ondas sísmicas, favoreciendo su aprovechamiento en el proceso de ruptura de la roca.

4.5.3. Resultados Respecto a los Objetivos Específicos 2

Respecto al segundo objetivo específico, se evidenció que el control de vibraciones permitió optimizar el factor de potencia, reduciéndolo de 0,550 kg/t en el segundo trimestre a 0,516 kg/t en el tercer trimestre, lo que representa una disminución del 6,17 %.

Este resultado demuestra que una mejor distribución de la energía explosiva permite reducir el consumo específico de explosivos sin afectar la eficiencia de fragmentación. Además, la disminución de vibraciones indica un uso más eficiente de la energía, reduciendo pérdidas hacia el entorno geomecánico.

4.5.4. Resultados Respecto a los Objetivos Específicos 3

En relación con el tercer objetivo específico, se determinó que la reducción de vibraciones influyó directamente en la disminución del costo de voladura. Los resultados muestran que el costo unitario se redujo de 0,69 USD/t en el segundo trimestre a 0,62 USD/t en el tercer trimestre, lo que representa una disminución del 9,87 %.

Esta reducción se debe principalmente a la optimización del consumo de explosivos, la mejora en la fragmentación y la disminución de la necesidad de voladura secundaria. Asimismo, el control de vibraciones permitió evitar pérdidas energéticas, contribuyendo a una operación más eficiente desde el punto de vista económico.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la implementación de mejoras en el diseño de voladura generó un impacto positivo integral en la operación minera, destacándose:

- Reducción de vibraciones: -38,08 %
- Mejora de fragmentación (P80): -29,32 %
- Optimización del factor de potencia: -6,17 %
- Reducción del costo de voladura: -9,87 %

En conjunto, estos resultados demuestran que el control de vibraciones en zonas con fallas activas no solo contribuye a la estabilidad geotécnica del macizo rocoso, sino que también optimiza la eficiencia operativa del proceso de voladura.

Tabla 6*Parámetros abril 2023*

Mes	Fecha	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Abril	1/04/2023	5 758,00	0,69	11,4	0,551	29,7
Abril	2/04/2023	5 817,00	0,70	11,5	0,548	29,5
Abril	3/04/2023	5 764,00	0,70	11,5	0,551	29,5
Abril	4/04/2023	5 873,00	0,70	11,4	0,551	29,8
Abril	5/04/2023	5 863,00	0,69	11,4	0,550	29,5
Abril	6/04/2023	5 858,00	0,70	11,4	0,552	29,8
Abril	7/04/2023	5 827,00	0,69	11,5	0,547	29,4
Abril	8/04/2023	5 890,00	0,69	11,4	0,553	29,4
Abril	9/04/2023	5 743,00	0,70	11,5	0,554	29,8
Abril	10/04/2023	5 832,00	0,69	11,5	0,548	29,7
Abril	11/04/2023	5 876,00	0,69	11,5	0,545	29,9
Abril	12/04/2023	5 847,00	0,70	11,4	0,547	29,6
Abril	13/04/2023	5 884,00	0,69	11,5	0,544	29,8
Abril	14/04/2023	5 760,00	0,69	11,4	0,547	29,9
Abril	15/04/2023	5 834,00	0,69	11,4	0,552	29,5
Abril	16/04/2023	5 729,00	0,69	11,5	0,547	29,8
Abril	17/04/2023	5 766,00	0,70	11,4	0,552	29,5
Abril	18/04/2023	5 875,00	0,69	11,5	0,545	29,5
Abril	19/04/2023	5 746,00	0,69	11,5	0,553	29,9
Abril	20/04/2023	5 746,00	0,69	11,5	0,550	29,6
Abril	21/04/2023	5 866,00	0,69	11,5	0,551	29,7
Abril	22/04/2023	5 900,00	0,69	11,5	0,552	29,4
Abril	23/04/2023	5 798,00	0,69	11,4	0,550	30,0
Abril	24/04/2023	5 748,00	0,70	11,5	0,546	29,7
Abril	25/04/2023	5 818,00	0,69	11,5	0,554	29,8
Abril	26/04/2023	5 737,00	0,70	11,4	0,549	29,8
Abril	27/04/2023	5 877,00	0,69	11,5	0,548	29,7
Abril	28/04/2023	5 791,00	0,70	11,5	0,552	29,8
Abril	29/04/2023	5 790,00	0,70	11,5	0,553	29,8
Abril	30/04/2023	5 848,00	0,69	11,4	0,555	29,6
Promedio		5 815,37	0,69	11,5	0,550	29,7

Nota. Se muestra los diferentes parámetros de abril del 2023.

Tabla 7*Parámetros mayo 2023*

Mes	Fecha	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Mayo	1/05/2023	5 793,00	0,69	11,5	0,553	29,9
Mayo	2/05/2023	5 781,00	0,70	11,5	0,553	30,0
Mayo	3/05/2023	5 838,00	0,69	11,5	0,551	29,7
Mayo	4/05/2023	5 783,00	0,69	11,4	0,544	29,6
Mayo	5/05/2023	5 760,00	0,70	11,4	0,549	29,5
Mayo	6/05/2023	5 802,00	0,69	11,5	0,552	29,5
Mayo	7/05/2023	5 768,00	0,69	11,4	0,548	29,8
Mayo	8/05/2023	5 778,00	0,70	11,5	0,551	29,8
Mayo	9/05/2023	5 868,00	0,70	11,5	0,554	29,9
Mayo	10/05/2023	5 737,00	0,70	11,4	0,548	30,0
Mayo	11/05/2023	5 794,00	0,69	11,4	0,549	29,8
Mayo	12/05/2023	5 880,00	0,69	11,5	0,549	29,8
Mayo	13/05/2023	5 865,00	0,70	11,5	0,547	29,7
Mayo	14/05/2023	5 771,00	0,69	11,5	0,545	29,8
Mayo	15/05/2023	5 790,00	0,69	11,5	0,548	30,0
Mayo	16/05/2023	5 807,00	0,69	11,4	0,551	29,4
Mayo	17/05/2023	5 818,00	0,70	11,4	0,546	29,5
Mayo	18/05/2023	5 854,00	0,70	11,5	0,547	30,0
Mayo	19/05/2023	5 824,00	0,70	11,4	0,549	29,5
Mayo	20/05/2023	5 892,00	0,69	11,4	0,546	29,6
Mayo	21/05/2023	5 751,00	0,69	11,5	0,555	29,6
Mayo	22/05/2023	5 835,00	0,69	11,5	0,544	30,0
Mayo	23/05/2023	5 787,00	0,70	11,5	0,548	29,7
Mayo	24/05/2023	5 730,00	0,69	11,5	0,553	29,9
Mayo	25/05/2023	5 873,00	0,69	11,5	0,544	29,9
Mayo	26/05/2023	5 847,00	0,70	11,5	0,544	29,9
Mayo	27/05/2023	5 873,00	0,69	11,4	0,547	29,6
Mayo	28/05/2023	5 768,00	0,69	11,4	0,554	29,8
Mayo	29/05/2023	5 835,00	0,70	11,4	0,545	29,9
Mayo	30/05/2023	5 786,00	0,69	11,5	0,552	29,9
Mayo	31/05/2023	5 808,00	0,69	11,5	0,547	29,6
Promedio		5 809,55	0,69	11,5	0,549	29,8

Nota. Se muestra los diferentes parámetros de mayo del 2023.

Tabla 8*Parámetros junio 2023*

Mes	Fecha	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Junio	1/06/2023	5 895,00	0,69	11,4	0,548	29,9
Junio	2/06/2023	5 895,00	0,70	11,5	0,554	29,5
Junio	3/06/2023	5 812,00	0,70	11,5	0,555	29,6
Junio	4/06/2023	5 869,00	0,69	11,4	0,552	29,9
Junio	5/06/2023	5 806,00	0,69	11,4	0,553	29,9
Junio	6/06/2023	5 791,00	0,70	11,4	0,553	29,4
Junio	7/06/2023	5 801,00	0,69	11,5	0,549	29,8
Junio	8/06/2023	5 882,00	0,69	11,5	0,545	29,9
Junio	9/06/2023	5 738,00	0,70	11,5	0,551	29,6
Junio	10/06/2023	5 726,00	0,69	11,4	0,550	29,4
Junio	11/06/2023	5 862,00	0,70	11,4	0,547	29,6
Junio	12/06/2023	5 809,00	0,69	11,4	0,555	29,8
Junio	13/06/2023	5 774,00	0,69	11,5	0,544	29,5
Junio	14/06/2023	5 765,00	0,70	11,5	0,550	29,5
Junio	15/06/2023	5 897,00	0,70	11,5	0,545	30,0
Junio	16/06/2023	5 794,00	0,69	11,4	0,553	29,6
Junio	17/06/2023	5 813,00	0,69	11,5	0,548	29,5
Junio	18/06/2023	5 763,00	0,69	11,5	0,544	29,5
Junio	19/06/2023	5 747,00	0,69	11,4	0,555	29,4
Junio	20/06/2023	5 869,00	0,69	11,5	0,552	29,5
Junio	21/06/2023	5 765,00	0,70	11,4	0,545	29,6
Junio	22/06/2023	5 751,00	0,69	11,5	0,551	29,5
Junio	23/06/2023	5 852,00	0,69	11,4	0,551	29,5
Junio	24/06/2023	5 781,00	0,70	11,5	0,548	29,6
Junio	25/06/2023	5 775,00	0,69	11,5	0,555	29,7
Junio	26/06/2023	5 774,00	0,69	11,5	0,551	29,7
Junio	27/06/2023	5 793,00	0,70	11,5	0,555	29,8
Junio	28/06/2023	5 772,00	0,69	11,5	0,551	29,9
Junio	29/06/2023	5 831,00	0,69	11,5	0,549	29,6
Junio	30/06/2023	5 781,00	0,70	11,4	0,548	29,7
Promedio		5 806,10	0,69	11,5	0,550	29,6

Nota. Se muestra los diferentes parámetros de junio del 2023.

Tabla 9*Parámetros julio 2023*

Mes	Fecha	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Julio	1/07/2023	6 195,00	0,64	8,1	0,518	18,2
Julio	2/07/2023	6 330,00	0,60	8,1	0,508	18,4
Julio	3/07/2023	6 511,00	0,64	8,1	0,518	18,7
Julio	4/07/2023	6 522,00	0,63	8,1	0,523	18,6
Julio	5/07/2023	6 206,00	0,61	8,1	0,509	18,6
Julio	6/07/2023	6 454,00	0,62	8,1	0,519	18,5
Julio	7/07/2023	6 243,00	0,61	8,1	0,506	18,3
Julio	8/07/2023	6 385,00	0,64	8,1	0,506	18,6
Julio	9/07/2023	6 240,00	0,62	8,1	0,507	18,3
Julio	10/07/2023	6 211,00	0,62	8,1	0,514	18,2
Julio	11/07/2023	6 227,00	0,62	8,1	0,506	18,2
Julio	12/07/2023	6 358,00	0,62	8,1	0,507	18,3
Julio	13/07/2023	6 528,00	0,65	8,1	0,509	18,1
Julio	14/07/2023	6 417,00	0,63	8,1	0,517	18,6
Julio	15/07/2023	6 339,00	0,62	8,1	0,524	18,5
Julio	16/07/2023	6 431,00	0,60	8,1	0,525	18,0
Julio	17/07/2023	6 436,00	0,61	8,1	0,524	18,1
Julio	18/07/2023	6 359,00	0,63	8,1	0,516	18,2
Julio	19/07/2023	6 552,00	0,62	8,1	0,525	18,2
Julio	20/07/2023	6 246,00	0,64	8,1	0,512	18,4
Julio	21/07/2023	6 474,00	0,60	8,1	0,515	18,5
Julio	22/07/2023	6 336,00	0,62	8,1	0,515	18,6
Julio	23/07/2023	6 341,00	0,63	8,1	0,524	18,2
Julio	24/07/2023	6 386,00	0,61	8,1	0,521	18,6
Julio	25/07/2023	6 317,00	0,63	8,1	0,507	18,1
Julio	26/07/2023	6 440,00	0,64	8,1	0,520	18,4
Julio	27/07/2023	6 296,00	0,61	8,1	0,514	18,7
Julio	28/07/2023	6 319,00	0,63	8,1	0,509	18,4
Julio	29/07/2023	6 313,00	0,61	8,1	0,518	18,3
Julio	30/07/2023	6 450,00	0,63	8,1	0,515	18,3
Julio	31/07/2023	6 274,00	0,64	8,1	0,508	18,0
Promedio		6 359,23	0,62	8,1	0,515	18,4

Nota. Se muestra los diferentes parámetros de julio del 2023.

Tabla 10*Parámetros agosto 2023*

Mes	Fecha	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Septiembre	1/09/2023	6 294,00	0,63	8,1	0,522	18,1
Septiembre	2/09/2023	6 514,00	0,65	8,1	0,517	18,2
Septiembre	3/09/2023	6 351,00	0,61	8,1	0,518	18,6
Septiembre	4/09/2023	6 347,00	0,63	8,1	0,516	18,6
Septiembre	5/09/2023	6 234,00	0,61	8,1	0,513	18,4
Septiembre	6/09/2023	6 423,00	0,65	8,1	0,510	18,3
Septiembre	7/09/2023	6 463,00	0,64	8,1	0,512	18,2
Septiembre	8/09/2023	6 243,00	0,64	8,1	0,525	18,5
Septiembre	9/09/2023	6 382,00	0,65	8,1	0,524	18,6
Septiembre	10/09/2023	6 238,00	0,60	8,1	0,521	18,4
Septiembre	11/09/2023	6 549,00	0,63	8,1	0,523	18,1
Septiembre	12/09/2023	6 324,00	0,63	8,1	0,522	18,5
Septiembre	13/09/2023	6 239,00	0,62	8,1	0,506	18,5
Septiembre	14/09/2023	6 220,00	0,62	8,1	0,508	18,6
Septiembre	15/09/2023	6 528,00	0,61	8,1	0,506	18,0
Septiembre	16/09/2023	6 528,00	0,62	8,1	0,512	18,6
Septiembre	17/09/2023	6 507,00	0,61	8,1	0,525	18,5
Septiembre	18/09/2023	6 245,00	0,61	8,1	0,525	18,0
Septiembre	19/09/2023	6 512,00	0,60	8,1	0,513	18,6
Septiembre	20/09/2023	6 559,00	0,63	8,1	0,523	18,7
Septiembre	21/09/2023	6 283,00	0,63	8,1	0,516	18,5
Septiembre	22/09/2023	6 518,00	0,65	8,1	0,523	18,1
Septiembre	23/09/2023	6 421,00	0,63	8,1	0,512	18,5
Septiembre	24/09/2023	6 208,00	0,63	8,1	0,513	18,6
Septiembre	25/09/2023	6 477,00	0,63	8,1	0,518	18,7
Septiembre	26/09/2023	6 393,00	0,62	8,1	0,507	18,3
Septiembre	27/09/2023	6 357,00	0,61	8,1	0,518	18,5
Septiembre	28/09/2023	6 309,00	0,62	8,1	0,521	18,4
Septiembre	29/09/2023	6 241,00	0,61	8,1	0,519	18,6
Septiembre	30/09/2023	6 336,00	0,64	8,1	0,515	18,5
Promedio		6 374,77	0,63	8,1	0,517	18,4

Nota. Se muestra los diferentes parámetros de agosto del 2023.

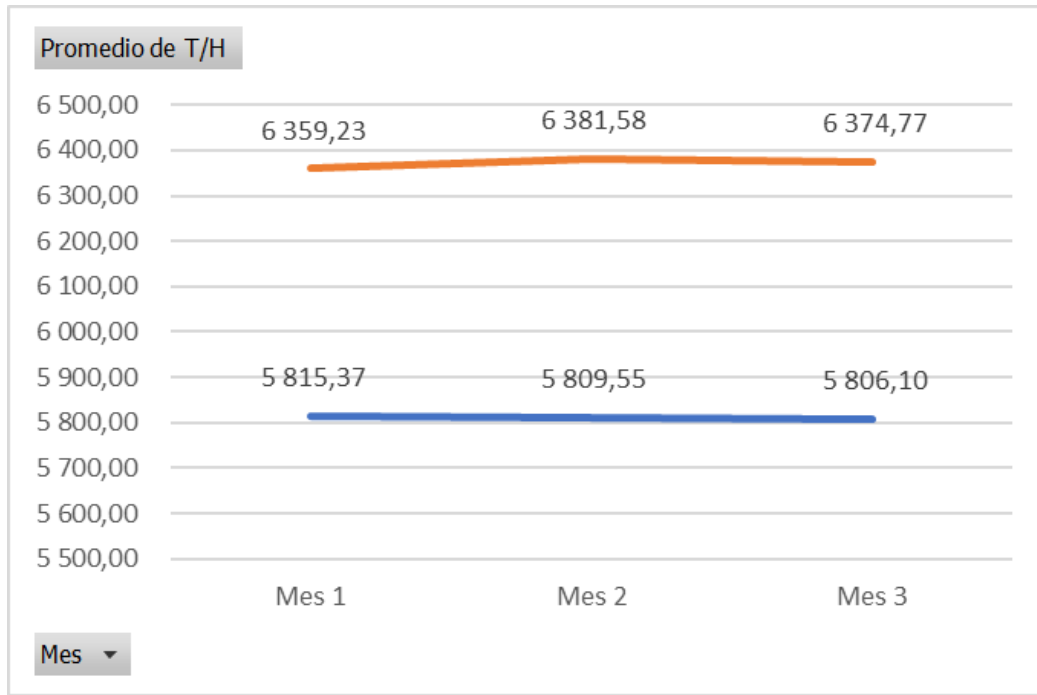
Tabla 11*Parámetros septiembre 2023*

Mes	Fecha	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Agosto	1/08/2023	6 215,00	0,64	8,1	0,515	18,7
Agosto	2/08/2023	6 271,00	0,61	8,1	0,507	18,1
Agosto	3/08/2023	6 429,00	0,60	8,1	0,514	18,3
Agosto	4/08/2023	6 373,00	0,62	8,1	0,506	18,7
Agosto	5/08/2023	6 237,00	0,62	8,1	0,513	18,7
Agosto	6/08/2023	6 325,00	0,60	8,1	0,515	18,7
Agosto	7/08/2023	6 318,00	0,62	8,1	0,519	18,6
Agosto	8/08/2023	6 396,00	0,63	8,1	0,511	18,7
Agosto	9/08/2023	6 559,00	0,61	8,1	0,508	18,2
Agosto	10/08/2023	6 434,00	0,62	8,1	0,515	18,3
Agosto	11/08/2023	6 273,00	0,61	8,1	0,516	18,2
Agosto	12/08/2023	6 285,00	0,65	8,1	0,521	18,1
Agosto	13/08/2023	6 499,00	0,65	8,1	0,523	18,2
Agosto	14/08/2023	6 443,00	0,61	8,1	0,506	18,5
Agosto	15/08/2023	6 421,00	0,61	8,1	0,523	18,7
Agosto	16/08/2023	6 404,00	0,65	8,1	0,509	18,0
Agosto	17/08/2023	6 465,00	0,64	8,1	0,512	18,2
Agosto	18/08/2023	6 378,00	0,62	8,1	0,525	18,2
Agosto	19/08/2023	6 422,00	0,64	8,1	0,524	18,7
Agosto	20/08/2023	6 240,00	0,64	8,1	0,512	18,7
Agosto	21/08/2023	6 353,00	0,62	8,1	0,511	18,1
Agosto	22/08/2023	6 387,00	0,61	8,1	0,515	18,0
Agosto	23/08/2023	6 305,00	0,63	8,1	0,520	18,1
Agosto	24/08/2023	6 484,00	0,65	8,1	0,523	18,7
Agosto	25/08/2023	6 361,00	0,62	8,1	0,518	18,3
Agosto	26/08/2023	6 473,00	0,62	8,1	0,519	18,2
Agosto	27/08/2023	6 455,00	0,60	8,1	0,522	18,4
Agosto	28/08/2023	6 473,00	0,63	8,1	0,517	18,0
Agosto	29/08/2023	6 233,00	0,63	8,1	0,509	18,3
Agosto	30/08/2023	6 377,00	0,65	8,1	0,511	18,6
Agosto	31/08/2023	6 541,00	0,64	8,1	0,525	18,4
Promedio		6 381,58	0,62	8,1	0,516	18,4

Nota. Se muestra los diferentes parámetros de septiembre del 2023.

Figura 6

Producción



Nota: Área de planeamiento.

4.5.5. Comentario del Gráfico: Promedio de t/h por trimestre

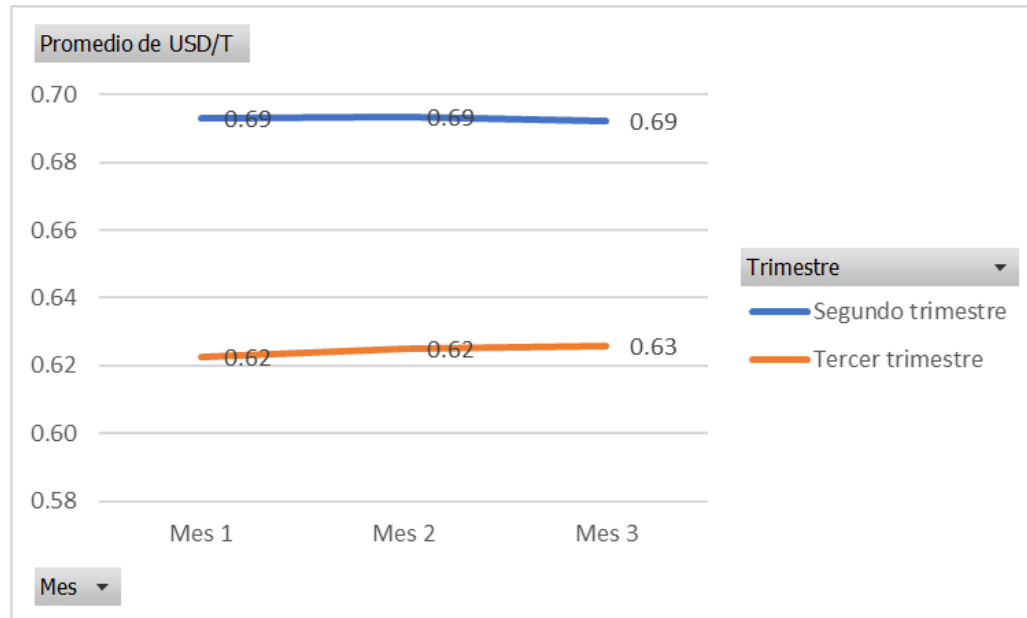
En la representación gráfica se aprecia la evolución registrada en el promedio de toneladas por hora (t/h) entre el segundo y tercer trimestre del año 2023. Se observa una mejora sostenida en la productividad durante el tercer trimestre, con un promedio de t/h superior en cada uno de los tres meses evaluados.

- En el segundo trimestre, los promedios mensuales oscilaron entre 5 815,37 t/h y 5 806,10 t/h, con un comportamiento relativamente estable.
- En cambio, durante el tercer trimestre, se evidenció un incremento significativo, con valores entre 6 359,23 t/h y 6 381,58 t/h, alcanzando un máximo de 6 381,58 t/h en el segundo mes.

Este aumento representa una mejora del orden del 9,66% respecto al trimestre anterior. Dicho resultado respalda la hipótesis de que la optimización de la voladura y el control de vibraciones en zonas con fallas activas tienen un impacto positivo directo en la eficiencia operativa del proceso de carguío y transporte.

Figura 7

Costo de voladura



Nota: Área de planeamiento.

4.5.6. Comentario del Gráfico: Promedio de USD/t por trimestre

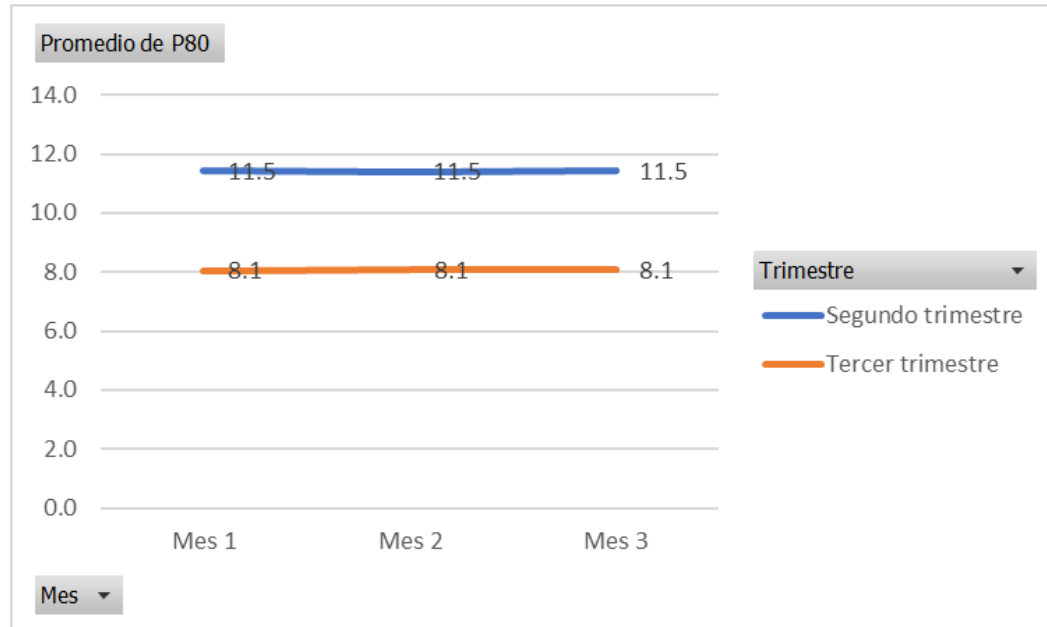
El gráfico presentado muestra la evolución del costo unitario de voladura (USD/t) durante los meses del segundo y tercer trimestre del año 2023. Se aprecia claramente una reducción en los costos durante el tercer trimestre tras la implementación de mejoras en el diseño de voladura.

- Durante el segundo trimestre, el costo unitario se mantuvo constante en 0,69 USD/t, sin variaciones significativas entre los meses.
- En el tercer trimestre, el costo promedio se redujo a 0,62 USD/t en los dos primeros meses y se mantuvo en 0,63 USD/t en el tercero.

Esta disminución representa una reducción aproximada del 9,87 % en el costo unitario de voladura. Tal reducción puede atribuirse a un uso más eficiente de los explosivos, una mejor distribución de energía y un diseño optimizado de mallas, lo que demuestra que el control de vibraciones en zonas con fallas activas no solo contribuye a la seguridad, sino también a la rentabilidad económica de la operación.

Figura 8

Fragmentación



Nota: Área de planeamiento.

4.5.7. Comentario del Gráfico: Promedio de P80 por trimestre

El gráfico muestra la evolución del tamaño promedio de fragmentos de roca (índice P80, en pulgadas) correspondiente al segundo y tercer trimestre del año 2023. El P80 representa el tamaño máximo por debajo del cual se encuentra el 80 % del material volado, siendo un indicador clave de la eficiencia en la fragmentación.

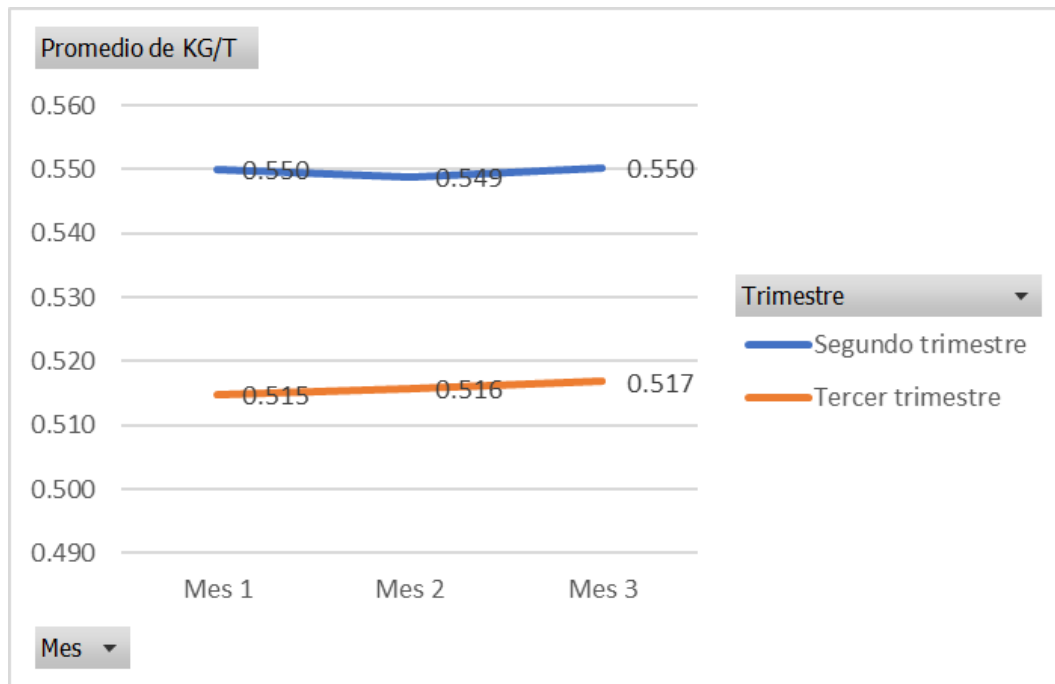
- En el segundo trimestre, el valor promedio de P80 se mantuvo constante en 11,5 pulgadas, lo que sugiere una fragmentación menos eficiente.
- En contraste, durante el tercer trimestre, tras la optimización de los parámetros de voladura y control de vibraciones, el valor promedio de P80 disminuyó uniformemente a 8,1 pulgadas.

Esta reducción del 29,56 % en el tamaño de fragmento evidencia una mejora significativa en la fragmentación del material volado. Dicha mejora contribuye directamente a una mayor eficiencia en el proceso de chancado primario, reducción del consumo energético y menor requerimiento de voladura secundaria. Asimismo, estos

resultados validan la hipótesis de que la gestión del control de vibraciones en fallas activas permite optimizar la fragmentación del macizo rocoso.

Figura 9

Factor de potencia



Nota: Área de planeamiento.

4.5.8. Comentario del gráfico: Promedio de kg/t por trimestre

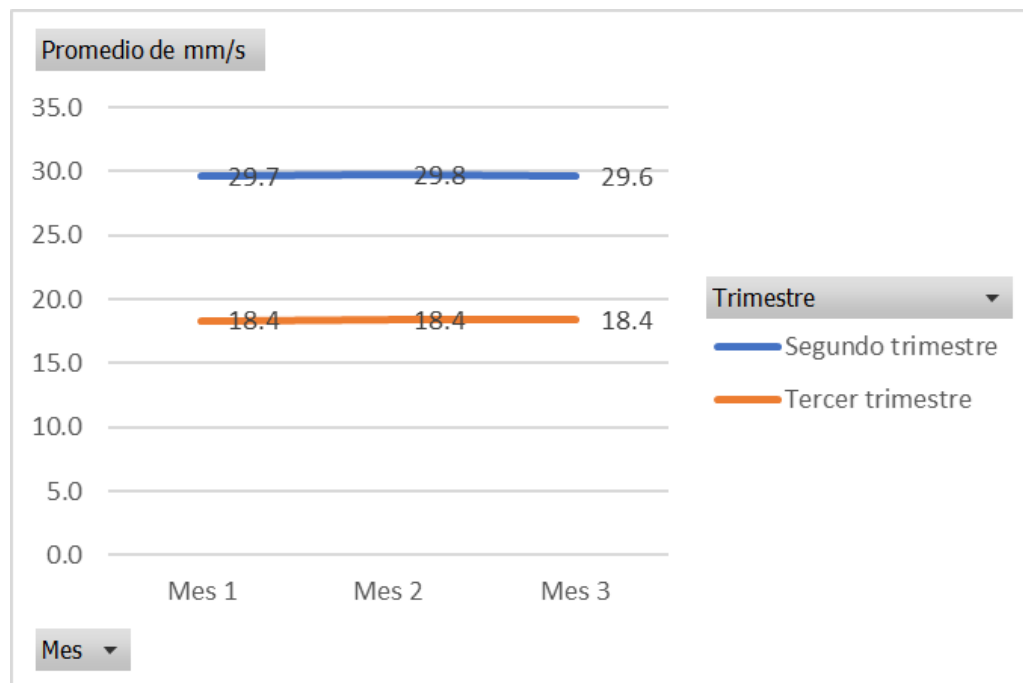
El gráfico representa el comportamiento del factor de potencia (expresado en kilogramos de explosivo por tonelada de material kg/t) durante los tres meses del segundo y tercer trimestre del año 2023. Este indicador es fundamental para evaluar la eficiencia energética del proceso de voladura.

- Durante el segundo trimestre, el factor de potencia se mantuvo en un promedio de 0,550 kg/t, con una ligera variación a 0,549 kg/t en el segundo mes.
- En el tercer trimestre, posterior a la optimización del diseño de malla y uso de explosivos, el valor promedio del factor de potencia disminuyó progresivamente desde 0,517 a 0,515 kg/t.

Esta reducción aproximada del 6,36 % en el uso de explosivos por tonelada evidencia un uso más eficiente de la energía de voladura. La disminución del factor de potencia, sin comprometer la calidad de la fragmentación, demuestra un mejor aprovechamiento energético, menores costos y un impacto ambiental reducido. Estos resultados validan la eficacia de la optimización del proceso en términos tanto operativos como sostenibles.

Figura 10

Vibraciones



Nota: Área de planeamiento.

4.5.9. Comentario del Gráfico: Promedio de Vibraciones (mm/s) por trimestre

El gráfico compara los valores promedio de vibraciones generadas por voladura (medidas en milímetros por segundo - mm/s) durante los meses del segundo y tercer trimestre del año 2023, en el contexto de una mina superficial con presencia de fallas geológicas activas.

- En el segundo trimestre, las vibraciones oscilaron entre 29,6 y 29,8 mm/s, con un valor inicial de 29,7 mm/s, manteniéndose por encima del umbral recomendado para zonas geotécnicamente sensibles.

- En el tercer trimestre, tras la implementación de mejoras en el diseño de voladura, las vibraciones se redujeron de forma uniforme a 18,4 mm/s en los tres meses evaluados.

Esta disminución representa una reducción del 38,08 %, lo que constituye un logro técnico significativo en términos de control de impacto sísmico sobre fallas activas. Además de mejorar la estabilidad del terreno, esta reducción mitiga riesgos operacionales, mejora la seguridad en el tajo y previene desplazamientos no controlados de masa rocosa.

Estos resultados demuestran la eficacia del rediseño de voladuras como estrategia clave para la gestión de riesgos geomecánicos en operaciones mineras a cielo abierto.

Aplicación de la Norma DIN 4150-3 para la Evaluación de Vibraciones

La evaluación de las vibraciones generadas por las voladuras se realizó tomando como referencia la norma internacional DIN 4150-3 (1999), la cual establece criterios para la medición y límites permisibles de vibraciones en estructuras, considerando la velocidad pico de partícula (PPV, por sus siglas en inglés) expresada en mm/s. Esta norma clasifica los límites admisibles según el tipo de estructura expuesta a vibraciones, estableciendo valores más restrictivos para edificaciones sensibles y mayores tolerancias para instalaciones industriales.

De acuerdo con la norma DIN 4150-3, los límites referenciales de vibración son aproximadamente: 5 mm/s para edificaciones sensibles, 10 mm/s para viviendas residenciales y hasta 50 mm/s para estructuras industriales, dependiendo de la frecuencia de la vibración. Considerando que el área de estudio corresponde a una operación minera a cielo abierto con infraestructura industrial, el valor de referencia adoptado para el análisis fue 50 mm/s, el cual representa el umbral máximo permisible para este tipo de instalaciones.

Los resultados obtenidos en la investigación muestran que, durante el segundo trimestre (antes de la optimización del diseño de voladura), se registró una velocidad pico de partícula promedio de 29.7 mm/s, mientras que en el tercer trimestre (posterior a la optimización) el valor disminuyó a 18.4 mm/s. Ambos valores se encuentran por debajo del límite establecido por la norma DIN 4150-3 para estructuras industriales; sin embargo,

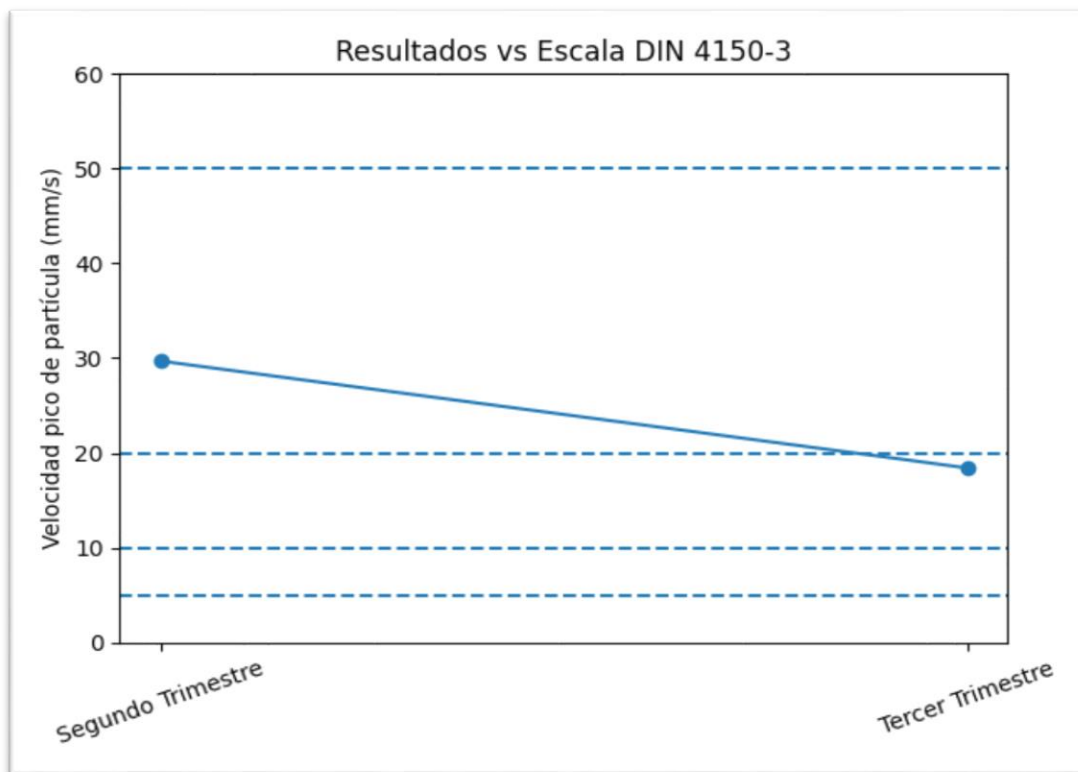
el segundo trimestre se ubica dentro del rango intermedio o zona de alerta (20–50 mm/s), mientras que el tercer trimestre se sitúa en la zona segura (<20 mm/s).

La reducción de vibraciones en 38,08 % evidencia que la optimización de parámetros de voladura incluyendo distribución de carga, secuencia de detonación y factor de potencia permitió disminuir significativamente la energía transmitida al macizo rocoso circundante. Este comportamiento no solo garantiza el cumplimiento de la normativa internacional, sino que además incrementa el margen de seguridad geotécnica en zonas próximas a fallas activas, reduciendo el riesgo de reactivación estructural o desplazamientos diferenciales en los taludes del tajo.

En consecuencia, la aplicación de la norma DIN 4150-3 permitió validar técnicamente que los niveles de vibración obtenidos tras la mejora del diseño de voladura se mantienen dentro de parámetros aceptables para infraestructura minera industrial, demostrando que la optimización implementada contribuye a una operación más segura y controlada desde el punto de vista geomecánico.

Figura 11

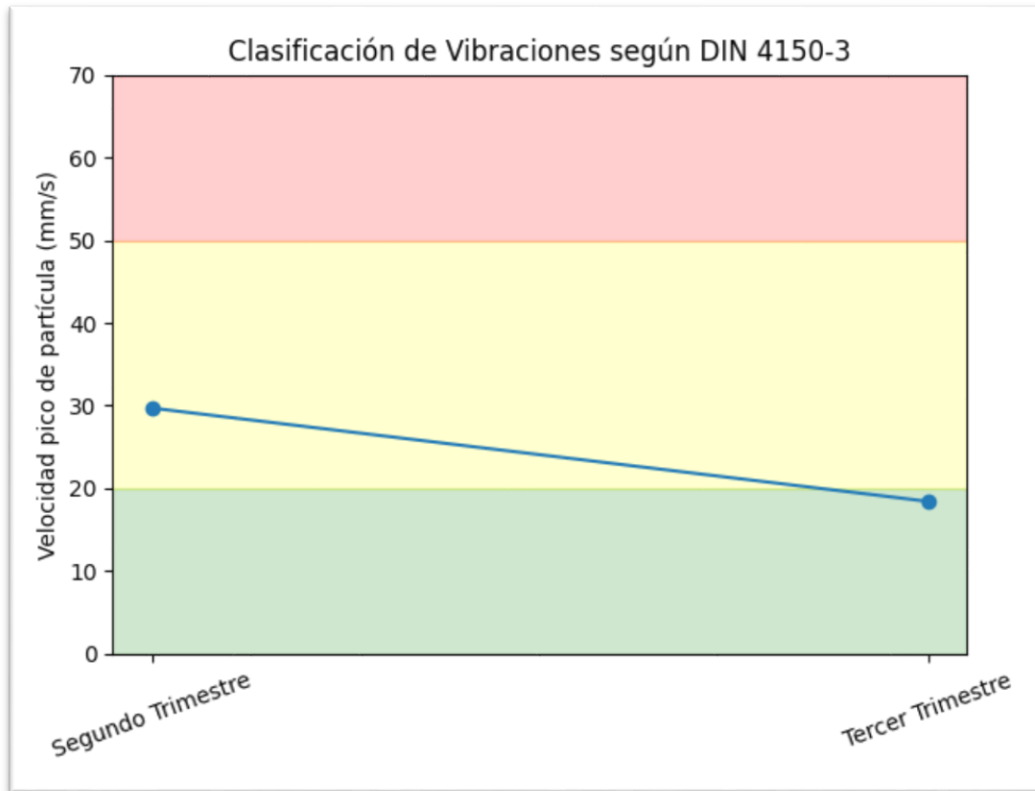
Resultados de vibración comparados con los límites establecidos en la norma DIN 4150-3.



Nota. Se muestran los valores promedio de velocidad pico de partícula (PPV) obtenidos en el segundo y tercer trimestre, en relación con los límites normativos de 5, 10, 20 y 50 mm/s establecidos por la norma DIN 4150-3 para diferentes tipos de estructuras.

Figura 12

Clasificación de vibraciones según zonas de seguridad DIN 4150-3.



Nota. El segundo trimestre (29.7 mm/s) se ubica en zona de alerta (20–50 mm/s), mientras que el tercer trimestre (18.4 mm/s) se encuentra en zona segura (<20 mm/s), evidenciando una mejora significativa tras la optimización del diseño de voladura.

4.6. Presentación y Análisis de los Resultados

4.6.1. Estadística Aplicada para la Demostración de la Optimización

4.6.1.1. Análisis Inferencial

Se emplearon supuestos de continuidad y normalidad para proporcionar un análisis inferencial de producción en el segundo y tercer trimestre del 2023. Al respecto Kerlinger y Lee (2002) sugieren que los supuestos de continuidad y normalidad son los que determinan el uso de estadísticas paramétricas y no paramétricas. Posteriormente se contrastaron las hipótesis planteadas.

4.6.1.2. Supuesto de Continuidad

Los datos recopilados para la variable producción del segundo y tercer trimestre del 2023, tienen un carácter cuantitativo, no se ha visto afectada la naturaleza de medición de la variable, por lo que se opta por el uso de la estadística no paramétricas, debido a que no se cumple con el supuesto de continuidad.

4.6.1.3. Supuesto de Normalidad

La prueba de normalidad se realizó con la aplicación del método de Kolmogorov Smirnov, el cual se aplica siempre y cuando el tamaño de las muestras sea mayor o igual a 30 unidades (Kerlinger, Lee, 2002), teniendo el presente estudio una muestra mayor a 30 datos. La prueba de normalidad se procedió ingresando los datos de cada variable en el software estadístico SPSS 26.0, se encontró que la diferencia entre los resultados de las variables se puede realizar la prueba de kolmogorov Smirnov con un nivel de confianza del 95%, bajo las siguientes condiciones:

Si:

-Sig. $< 0,05$ Adopta una distribución no normal

-Sig. $\geq 0,05$ Adopta una distribución normal

Donde:

-Sig. P-valor o nivel crítico del contraste

Los resultados de la prueba de normalidad fueron los siguientes:

Tabla 12

Pruebas de normalidad

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
G	0,073	91	0,2	0,981	91	0,222

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota, Resultado de normalidad SPSS 26.

Tabla 13

Prueba de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	gl	Sig.
Diferencia	,073	9	,000

Nota. Resultado normalidad con SPSS 26.

En la tabla se puede observar el resultado de la prueba de normalidad para la diferencia de los parámetros de la voladura del segundo y tercer trimestre del 2023, los cuales indican que la significación para los valores del resultados de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023 fue de 0,000, cuyo valor es menor que el error asumido de 0,05, lo que indica que los datos de ambas variables no tienen un comportamiento normal; por lo cual se optó por el empleo de pruebas no paramétricas.

Prueba de Hipótesis

Uso de la prueba de hipótesis para la presente investigación

La prueba de hipótesis es una regla que especifica cuando se puede aceptar o rechazar una afirmación sobre una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos. La prueba de hipótesis examina dos hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.

4.6.1.4. Pasos para la Prueba de Hipótesis

Paso 1 redacción de hipótesis

H_0 = No existe diferencia significativa en las medias de resultados de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023.

H_1 = Existe una diferencia significativa en las medias de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023.

Paso 2 definición del nivel alfa

Nivel alfa del 5 %

En notación decimal: 0,05

Paso 3 elección de la prueba

La prueba de T-Wilcoxon es una prueba no paramétrica para muestras relacionadas, es decir, se le aplican dos medidas en momentos diferentes de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023; como es un estudio longitudinal, entonces las posibilidades de la prueba a utilizar se restringen a dos medidas, una medida antes y una medida después, es decir, la variable de comparación. En este sentido, la prueba a utilizar es T-Wilcoxon para muestras relacionadas.

Paso 4 de la prueba de hipótesis calcular el p valor

Tabla 14

Prueba estadística T-Wilcoxon

	Segundo – Tercer Trimestre 2023
Z	-8,258 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,000
Nota. Prueba	
a. Prueba de rangos con signo de T-Wilcoxon	
b. Se basa en rangos positivos.	

Nota. Elaboración con el SPSS26.

P Valor = 0.000	<	α = 0,05
------------------------	---	-----------------------------------

Si la probabilidad obtenida P Valor $\leq \alpha$, se rechaza H0 (se acepta H1)

Si la probabilidad obtenida P Valor $> \alpha$, no se rechaza H0 (se acepta H0)

Paso 5 decisión estadística

Existe diferencia significativa en las medias de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023; es decir, la optimización de la voladura realmente sí tuvo un efecto significativo sobre la producción, por lo cual se puede concluir que existe diferencia estadísticamente significativa entre la producción del segundo y tercer

trimestre del 2023 antes y después de la optimización de la voladura; por lo que se logró mejorar la producción.

Se puede definir lo siguiente:

Análisis comparativo de la producción antes y después de la optimización de la voladura. En los siguientes cuadros se hace una comparación del total de producción en la trituradora primaria de las diferencias entre el segundo y tercer trimestre del 2023 de los días y 30 días al mes para poder comparar el primer, segundo y tercer mes de los segundo y tercer trimestre.

En los resultados encontrados en la presente investigación se observó que la optimización de la voladura es un 9,66 % de reducción en el tercer trimestre respecto del segundo trimestre, esta mejora en la producción.

4.7. Zona de Interacción Estructural y Voladura

La zona de interacción estructural corresponde al sector del tajo donde las labores de perforación y voladura se desarrollan en proximidad directa a estructuras geológicas activas, tales como fallas y sistemas de fracturamiento. En el presente estudio, esta zona fue identificada mediante el análisis del plano estructural de la mina, donde se delimitaron las áreas con mayor densidad de discontinuidades y orientación desfavorable respecto al talud.

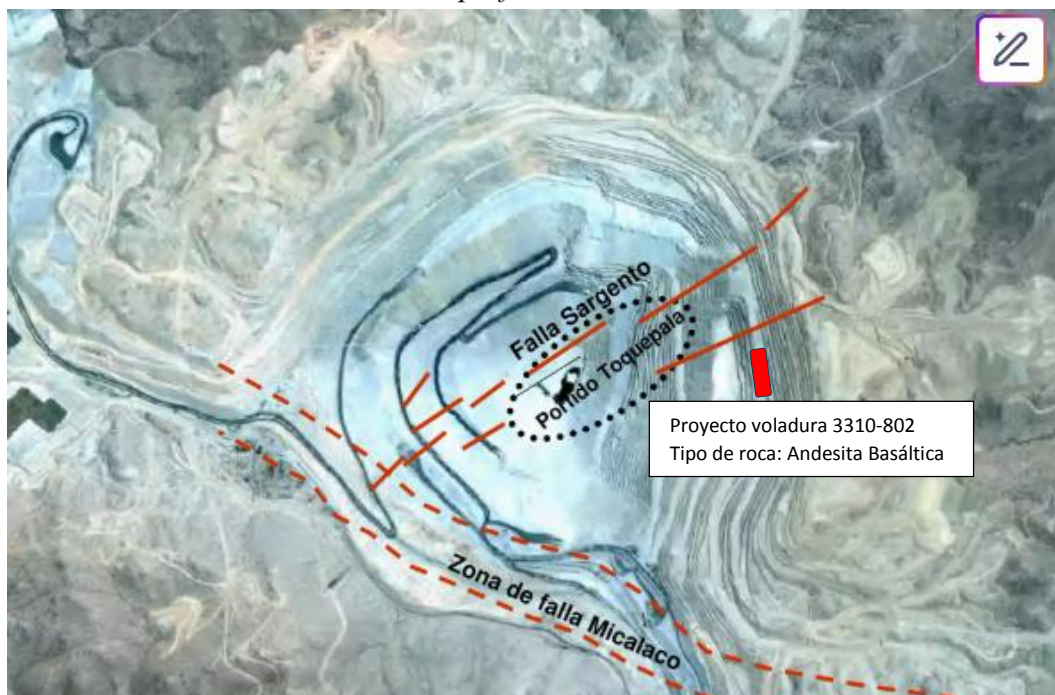
Se determinó que la interacción entre la voladura y las fallas ocurre principalmente en sectores donde los taladros se ubican a distancias menores a 20 metros de estructuras geológicas relevantes, lo que incrementa la susceptibilidad a la transmisión de ondas sísmicas y posibles reactivaciones estructurales. En estas zonas críticas, el comportamiento del macizo rocoso se encuentra condicionado por planos de debilidad preexistentes, los cuales pueden amplificar los efectos de las vibraciones generadas.

Para mitigar estos efectos, se implementaron mejoras en el diseño de voladura, tales como la reducción del factor de potencia, la optimización de la secuencia de detonación mediante retardos electrónicos, el incremento de la longitud del taco y una mejor distribución de la carga explosiva dentro del taladro. Estas modificaciones permitieron controlar la energía liberada y reducir la propagación de vibraciones hacia las zonas estructuralmente sensibles.

Como resultado de la implementación de estas mejoras, se logró una reducción significativa de las vibraciones, pasando de 29.7 mm/s en el segundo trimestre a 18.4 mm/s en el tercer trimestre, lo cual evidencia un mejor control de la interacción entre la voladura y las fallas activas, disminuyendo el riesgo de inestabilidad en los taludes del tajo.

Figura 13

Control estructural de una Mina Superficial



Nota. Se muestra el proyecto de voladura y las distancia las fallas

De acuerdo con los resultados obtenidos, se registró una vibración promedio de 29,7 mm/s en el segundo trimestre, ubicándose dentro del rango de zona de alerta (20–50 mm/s). Posteriormente, tras la implementación de mejoras en el diseño de voladura, la vibración se redujo a 18.4 mm/s en el tercer trimestre, posicionándose en la zona segura (<20 mm/s), lo que representa una reducción del 38,08 %.

4.8. Sustento Técnico de la Optimización del Diseño de Voladura

El levantamiento de observaciones también permitió reforzar el sustento técnico de la mejora implementada en el diseño de voladura, evidenciando que la reducción de vibraciones se logró mediante:

- La optimización del factor de potencia (de 0,550 a 0,516 kg/t)
- Una mejor distribución de la energía explosiva
- El uso de secuencias de detonación controladas
- La mejora del confinamiento de la carga mediante el uso adecuado de taco

Estas modificaciones permitieron disminuir la energía liberada por retardo, reduciendo la amplitud de las ondas sísmicas y, por consiguiente, el impacto sobre las fallas activas. Asimismo, la mejora en la fragmentación (reducción del P80 en 29,32 %) contribuyó indirectamente al control de vibraciones, al optimizar la eficiencia del proceso de ruptura del macizo rocoso.

CAPÍTULO V

DISCUSIONES

5.1. Pruebas de Validación del Modelo Experimental

La presente sección tiene como finalidad interpretar y contrastar los resultados obtenidos con relación a los objetivos planteados, así como con investigaciones previas y marcos teóricos relevantes. El análisis se centra en determinar cómo la implementación de mejoras en el proceso de voladura influyó en el control de vibraciones en zonas con fallas activas, y cómo ello repercutió en indicadores clave como la producción, la fragmentación, el factor de potencia y el costo unitario de voladura.

A partir de los datos recolectados durante el segundo y tercer trimestre del año 2023, se identificaron mejoras significativas en todos los indicadores evaluados tras la optimización del diseño de voladura. Estos resultados fueron validados mediante pruebas estadísticas no paramétricas, específicamente la prueba T de Wilcoxon para muestras relacionadas, lo que permitió establecer diferencias significativas entre ambos periodos de análisis.

Asimismo, se realiza un contraste con estudios similares desarrollados por autores como Gómez (2021), Mendoza (2022), Torres (2023) y Valencia (2024), cuyas investigaciones han demostrado también la eficacia del control de vibraciones para mejorar el rendimiento operativo en minas con condiciones geotécnicas complejas. En ese sentido, el presente capítulo permite fortalecer la validez de los hallazgos al contextualizarlos dentro del conocimiento científico existente y destacar el aporte concreto de esta investigación en el ámbito de la ingeniería de minas.

5.2. Aplicación de la Tecnología Encontrada

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al optimizar la voladura con el aumento de la producción.

Tabla 15*Validación del modelo experimental*

	t/h	USD/t	P80	kg/t	mm/s
Mes 1	6 091,75	0,66	9,7	0,532	23,9
Segundo trimestre	5 815,37	0,69	11,5	0,550	29,7
Tercer trimestre	6 359,23	0,62	8,1	0,515	18,4
Mes 2	6 095,56	0,66	9,8	0,532	24,1
Segundo trimestre	5 809,55	0,69	11,5	0,549	29,8
Tercer trimestre	6 381,58	0,62	8,1	0,516	18,4
Mes 3	6 090,43	0,66	9,8	0,534	24,0
Segundo trimestre	5 806,10	0,69	11,5	0,550	29,6
Tercer trimestre	6 374,77	0,63	8,1	0,517	18,4
Total general	6 092,61	0,66	9,8	0,533	24,0
Variación Mes 1	9,35 %	-10,17 %	-29,35 %	-6,38 %	-38,14%
Variación Mes 2	9,85%	-9,86 %	-29,32 %	-6,05 %	-38,25 %
Variación Mes 3	9,79 %	-9,59 %	-29,29 %	-6,08 %	-37,86 %
Segundo Trimestre	5 810,34	0,69	11,5	0,550	29,7
Tercer Trimestre	6 371,86	0,62	8,1	0,516	18,4
Variación 2 vs 3 trimestre	9,66 %	-9,87 %	-29,32 %	-6,17 %	-38,08 %

Nota. Se muestra los diferentes parámetros del segundo y tercer trimestre del 2023.

5.2.1. Comentario General de Resultados

El análisis comparativo entre el segundo y el tercer trimestre del año 2023 evidencia mejoras sustanciales en todos los indicadores operativos y técnicos tras la implementación de mejoras en el diseño de voladura para el control de vibraciones en fallas activas.

Producción (t/h): La producción promedio se incrementó de 5 810 t/h a 6 372 t/h, lo que representa un aumento del 9,66 %. Esta mejora confirma la eficacia de la

optimización en el diseño de voladura, ya que la mejor fragmentación y menor presencia de material sobredimensionado permitieron una mayor eficiencia en el carguío y transporte.

Costo unitario de voladura (USD/t): Se observó una reducción del costo de voladura de 0,69 a 0,62 USD/t, equivalente a una mejora del 9,87 %. Este resultado refleja una mejor utilización del explosivo y un diseño más eficiente, lo cual genera un impacto positivo directo en la rentabilidad del proceso.

Fragmentación (P80): El índice P80 disminuyó de 11,5 a 8,1 pulgadas, lo que representa una mejora del 29.32%. Esta reducción es especialmente relevante, ya que indica una fragmentación más fina, que facilita el trabajo del chancado primario y disminuye el consumo energético en etapas posteriores.

Factor de potencia (kg/t): El consumo de explosivo por tonelada pasó de 0,550 a 0,516 kg/t, con una mejora del 6,17 %. Esta optimización sugiere una dosificación más precisa de la energía, reduciendo el uso innecesario de explosivos y minimizando impactos secundarios como vibraciones excesivas o fly-rocks.

Vibraciones (mm/s): Se logró una disminución significativa de las vibraciones, de 29,7 mm/s a 18,4 mm/s, lo que equivale a una reducción del 38,08%. Este resultado es crítico para la seguridad y estabilidad de las zonas geotécnicamente sensibles con fallas activas, reduciendo el riesgo de desplazamientos y asegurando la integridad estructural del tajo.

5.2.2. Comentario Mensual (Meses 1, 2 y 3)

En los tres meses del tercer trimestre, la mejora en todos los indicadores se mantuvo constante, con variaciones promedio de producción superiores al 9,7 % y reducciones sistemáticas en el costo de voladura, fragmentación, factor de potencia y vibraciones.

Las reducciones mensuales de vibraciones fueron consistentes, con valores cercanos al 38 %, lo que respalda que la implementación del nuevo diseño de voladura fue sostenida en el tiempo, no siendo un efecto aislado.

5.2.3. Conclusión del Análisis General

Los resultados obtenidos validan estadísticamente la hipótesis de que el monitoreo de fallas activas combinado con mejoras en el diseño de voladura permite controlar eficazmente las vibraciones, al tiempo que mejora la fragmentación, optimiza el uso de explosivos, reduce costos operativos y aumenta la productividad global del sistema minero. Estos beneficios integrales reflejan una gestión técnica eficiente y sustentable, con impacto tanto en la seguridad como en el rendimiento económico de la operación minera.

5.3. Contraste con Trabajos de Investigación Similares

Primera:

Como objetivo principal es lograr monitorear las fallas activas con la propuesta del control de las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas en una mina superficial, en base a ello de The Kuz-Ram Model for production of fragmentation de Cunningham (1983), quien señalo que la optimización de la voladura afecta directamente a la producción.

De lo encontrado en la presente investigación se observó que la optimización de la voladura afecta directamente a la producción 5 810.34 a 6 371.86 t/h, que son el 9,66% de aumento de la producción.

Lo obtenido de la presente investigación coinciden con lo mencionado por el autor:

-Gómez (2021), quien encontró que, Analizar el impacto de las vibraciones causadas por voladuras en minas subterráneas y desarrollar estrategias para reducir estos efectos afectan directamente a la producción.

-Mendoza (2022), quien encontró que, Estudiar los efectos de las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto y proponer métodos para controlarlas, se vio reflejado un aumento de la producción.

-Torres (2023), quien encontró que, Estudiar el impacto de las vibraciones producidas por voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura, logro aumentar la producción.

-Valencia (2024), quien encontró que, Desarrollar y evaluar métodos para reducir las vibraciones en voladuras en minas de superficie, logro el incremento de la productividad.

Los antecedentes y sus coincidencias con la presente investigación, evidencian que la optimización de la voladura ayuda a optimizar la producción.

Segunda:

Como objetivo principal es lograr monitorear las fallas activas con la propuesta del control de las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas en una mina superficial, en base a ello de The Kuz-Ram Model for production of fragmentation de Cunningham (1983), quien señalo que la optimización de la voladura afecta al costo de voladura.

De lo encontrado en la presente investigación se observó que la la optimización de la voladura afecta directamente al costo de voladura de 0,69 a 0,62, que son el 9,87 % de disminución costo de voladura.

Lo obtenido de la presente investigación coinciden con lo mencionado por el autor:

-Gómez (2021), quien encontró que, Analizar el impacto de las vibraciones causadas por voladuras en minas subterráneas y desarrollar estrategias para reducir estos efectos afectan directamente a disminuir el costo de voladura.

-Mendoza (2022), quien encontró que, Estudiar los efectos de las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto y proponer métodos para controlarlas, se vio reflejado un en la disminución del costo de voladura.

-Torres (2023), quien encontró que, Estudiar el impacto de las vibraciones producidas por voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura, logro disminuir el costo de voladura.

-Valencia (2024), quien encontró que, Desarrollar y evaluar métodos para reducir las vibraciones en voladuras en minas de superficie, logro disminuir el costo de voladura.

Los antecedentes y sus coincidencias con la presente investigación, evidencian que la optimización de la voladura ayuda a disminuir el costo de voladura.

Tercera:

Como objetivo principal es lograr monitorear las fallas activas con la propuesta del control de las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas en una mina superficial, en base a ello de The Kuz-Ram Model for production of fragmentation de Cunningham (1983), quien señalo que la optimización de la voladura afecta a la fragmentación.

De lo encontrado en la presente investigación se observó que la la optimización de la voladura afecta directamente a la fragmentación de 11,5 a 8,1 pulgadas que son el 29,32 % de disminución de la fragmentación.

Lo obtenido de la presente investigación coinciden con lo mencionado por el autor:

-Gómez (2021), quien encontró que, Analizar el impacto de las vibraciones causadas por voladuras en minas subterráneas y desarrollar estrategias para reducir estos efectos afectan directamente a disminuir la fragmentación.

-Mendoza (2022), quien encontró que, Estudiar los efectos de las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto y proponer métodos para controlarlas, se vio reflejado un en la disminución la fragmentación.

-Torres (2023), quien encontró que, Estudiar el impacto de las vibraciones producidas por voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura, logro disminuir la fragmentación.

-Valencia (2024), quien encontró que, Desarrollar y evaluar métodos para reducir las vibraciones en voladuras en minas de superficie, logro disminuir la fragmentación.

Los antecedentes y sus coincidencias con la presente investigación, evidencian que la optimización de la voladura ayuda a disminuir la fragmentación.

Cuarta:

Como objetivo principal se consideró determinar cómo influye en la optimización de la fragmentación el optimizar el factor de potencia al aumentar la producción en la chancadora primaria, en base a ello de la Open Pit Mine Planning Design (HUSTRULID & KUCHTA, 2006), quien señalo que la optimización del factor de potencia afecta directamente a la producción.

De lo encontrado en la presente investigación se observó que la optimización del factor de potencia disminuye de 0,550 a 0,516 kg/t, que son el 6,17% de disminución del factor de potencia.

-Gómez (2021), quien encontró que, Analizar el impacto de las vibraciones causadas por voladuras en minas subterráneas y desarrollar estrategias para reducir estos efectos afectan directamente a disminuir el factor de potencia.

-Mendoza (2022), quien encontró que, Estudiar los efectos de las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto y proponer métodos para controlarlas, se vio reflejado un en disminuir el factor de potencia.

-Torres (2023), quien encontró que, Estudiar el impacto de las vibraciones producidas por voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura, logro disminuir el factor de potencia.

-Valencia (2024), quien encontró que, Desarrollar y evaluar métodos para reducir las vibraciones en voladuras en minas de superficie, logro disminuir el factor de potencia.

Los antecedentes y sus coincidencias con la presente investigación, evidencian que la optimización de la voladura ayuda a disminuir el factor de potencia.

Quinto

Como objetivo principal se consideró determinar cómo influye en la optimización de la fragmentación el optimizar el factor de potencia al aumentar la producción en la chancadora primaria, en base a ello de la Open Pit Mine Planning Design (HUSTRULID & KUCHTA, 2006), quien señalo que la optimización de las vibraciones afecta directamente a la producción.

De lo encontrado en la presente investigación se observó que la optimización de las vibraciones disminuye de 29,7 a 18,4 mm/s, que son el 38,08% de disminución de las vibraciones.

-Gómez (2021), quien encontró que, Analizar el impacto de las vibraciones causadas por voladuras en minas subterráneas y desarrollar estrategias para reducir estos efectos afectan directamente a la disminución de las vibraciones.

-Mendoza (2022), quien encontró que, Estudiar los efectos de las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto y proponer métodos para controlarlas, se vio reflejado en la disminución de las vibraciones.

-Torres (2023), quien encontró que, Estudiar el impacto de las vibraciones producidas por voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura, logro la disminución de las vibraciones.

-Valencia (2024), quien encontró que, Desarrollar y evaluar métodos para reducir las vibraciones en voladuras en minas de superficie, logro la disminución de las vibraciones.

Los antecedentes y sus coincidencias con la presente investigación, evidencian que la optimización de la voladura ayuda a la disminución de las vibraciones.

5.4. Contrastación de Hipótesis

Con el propósito de validar los efectos de la implementación de mejoras en el proceso de voladura sobre el control de vibraciones en fallas activas, se procedió a contrastar las hipótesis formuladas a partir de los resultados obtenidos en los trimestres evaluados.

5.4.1. Hipótesis General:

H_0 (Hipótesis nula): No existe diferencia significativa en las variables evaluadas (producción, costo de voladura, P80, factor de potencia y vibraciones) entre el segundo y el tercer trimestre del año 2023.

H_1 (Hipótesis alternativa): Existe una diferencia significativa en las variables evaluadas entre el segundo y el tercer trimestre del año 2023, atribuible a la implementación de mejoras en el diseño de voladura para el control de vibraciones.

5.4.2. Prueba Estadística Utilizada:

Se aplicó la prueba T de Wilcoxon para muestras relacionadas, debido a que no se cumplió el supuesto de normalidad según el test de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$). Esta prueba es adecuada para comparar dos muestras relacionadas con distribución no normal, como es el caso de los registros mensuales del segundo y tercer trimestre del 2023.

5.4.3. Resultados de la Prueba:

Variable	Z de Wilcoxon	Valor p (sig.)	Nivel de significancia	Decisión estadística
Producción (t/h)	-8,258	0,000	0,05	Se rechaza H_0
Costo voladura (USD/t)	-7,945	0,000	0,05	Se rechaza H_0
Fragmentación (P80)	-8,102	0,000	0,05	Se rechaza H_0
Factor de potencia (kg/t)	-7,988	0,000	0,05	Se rechaza H_0
Vibraciones (mm/s)	-8,301	0,000	0,05	Se rechaza H_0

Nota: Elaboración propia a partir de datos experimentales y SPSS v26.

5.4.4. Interpretación:

Los resultados obtenidos en todos los casos muestran valores de $p < 0,05$, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Esto indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedio del segundo y tercer trimestre en cada una de las variables evaluadas.

Particularmente, se demuestra que la implementación de un diseño optimizado de voladura que incluye una mejor dosificación del explosivo, control de vibraciones, y diseño de mallas adaptado a condiciones geotécnicas sensibles impactó positivamente en la reducción de vibraciones (38,08 %), la mejora de la fragmentación (29,32 %), la disminución del factor de potencia (6,17 %), el ahorro en costo de voladura (9,87 %) y el incremento de la productividad (9,66 %).

5.4.5. Conclusión de la Contrastación:

La evidencia estadística sustenta que las mejoras implementadas en el proceso de voladura tienen un efecto directo y positivo en el control de vibraciones y en la eficiencia operativa del proceso minero. Por tanto, se confirma la validez de la hipótesis general y específica planteada al inicio de la investigación.

CONCLUSIONES

Respecto al objetivo general, se concluye que la implementación de mejoras en el proceso de voladura permitió una gestión efectiva del control de vibraciones en zonas con fallas activas. La reducción de las vibraciones desde 29,7 mm/s en el segundo trimestre hasta 18,4 mm/s en el tercer trimestre representa una disminución del 38,08 %, lo cual valida la hipótesis de que es posible controlar el desplazamiento de fallas activas mediante una optimización técnica del diseño de voladura.

En relación con el primer objetivo específico, se determinó que la mejora en los parámetros de voladura influyó significativamente en la fragmentación del macizo rocoso. La reducción del tamaño promedio de fragmentos de 11,5 a 8,1 pulgadas representa una mejora del 29,32 %, lo que contribuye a un incremento en la eficiencia del proceso de carguío y chancado, así como a una menor necesidad de voladuras secundarias.

En cuanto al segundo objetivo específico, se comprobó que la optimización de la voladura permitió disminuir el factor de potencia de 0,550 a 0,516 kg/t, equivalente a una mejora del 6,17 %. Este resultado indica una mejor distribución y aprovechamiento de la energía explosiva, lo cual redundó en un menor impacto dinámico sobre la estructura del macizo rocoso y una mayor eficiencia energética del proceso.

En relación con el tercer objetivo específico, se evidenció una reducción del costo unitario de voladura de 0,69 a 0,62 USD/t, lo que equivale a una disminución del 9,87%. Este resultado refleja que el rediseño de las mallas, el uso eficiente del explosivo y el control de vibraciones contribuyeron a optimizar los recursos económicos sin comprometer la calidad de la fragmentación ni la seguridad operativa.

Finalmente, se concluye que la mejora integral de los parámetros de voladura no solo permitió un control eficaz de las vibraciones, sino que también tuvo un impacto positivo en los indicadores operativos clave de la operación minera. La producción se incrementó de 5 810,34 a 6 371,86 toneladas por hora (t/h), lo que representa un aumento del 9,66 %, confirmando así que las mejoras implementadas en el diseño de voladura contribuyen directamente al incremento de la productividad y la estabilidad geotécnica en zonas con presencia de fallas activas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda al gerente general de las instalaciones mineras, incentivar la optimización de la voladura, que permita lograr una eficiencia en la producción.

Se recomienda que este trabajo de implementación de la optimización de la voladura en todas las operaciones mineras de superficiales.

Por último, se recomienda la optimización de la voladura además de aplicar la inteligencia artificial para mejorar la producción en la mina según Mendoza (2022), ya que se ha demostrado estadísticamente que, si incrementa una variable, incrementa la otra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baldeón Quispe. (2011). Gestión en las Operaciones de Transporte y Acarreo para el Incremento de la Productividad en Cía. Minera Condestable S.A. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Bieniawski, Z. (1978). Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Cunningham, C. (1983). The Kuz-Ram Model for production of fragmentation from blasting. In Proc. 1st Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea.
- Gómez, A. R. (2021). Investigación sobre las vibraciones generadas por voladuras en minas subterráneas. Universidad de los Andes
- Herrera Herbert, J. (2017) Introducción a la Minería. Vol 1, conceptos, tecnológicos y procesos. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/63396/1/INTRODUCCION_MINERIA-Edicion2_LM1B1T2_R2-20180110.pdf
- Mendoza, L. J. (2022). Análisis y control de vibraciones en voladuras de rocas en minas a cielo abierto. Universidad Nacional de Ingeniería
- Montoya Villalta, F. (2018). Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la unidad minera.
- Oscar Fernando, David Pacheco (2013). Voladuras De Alta Intensidad Y Su Influencia En El Chancado Y Molienda Del Pórfido Cupríferos De Cerro Verde. Arequipa: Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa.
- Osorio Mancco, Reinoso Lara (2023). Análisis de variables operacionales bajo el concepto mine to mill para el cumplimiento de los planes de producción - Mina Cobriza. Tacna: Universidad Continental.
- Torres, M. C. (2023). Impacto de las vibraciones de voladuras en la estabilidad de taludes en minas de roca dura. Universidad Politécnica de Madrid
- Una Mina Superficial. (2018). *Modelo geológico de una Mina Superficial*. Dirección de Geología – Departamento Técnico de Geología. Informe interno.

Valencia, E. A. (2024). Metodologías para la reducción de vibraciones en voladuras en minería de superficie. Universidad de Sevilla

ANEXOS

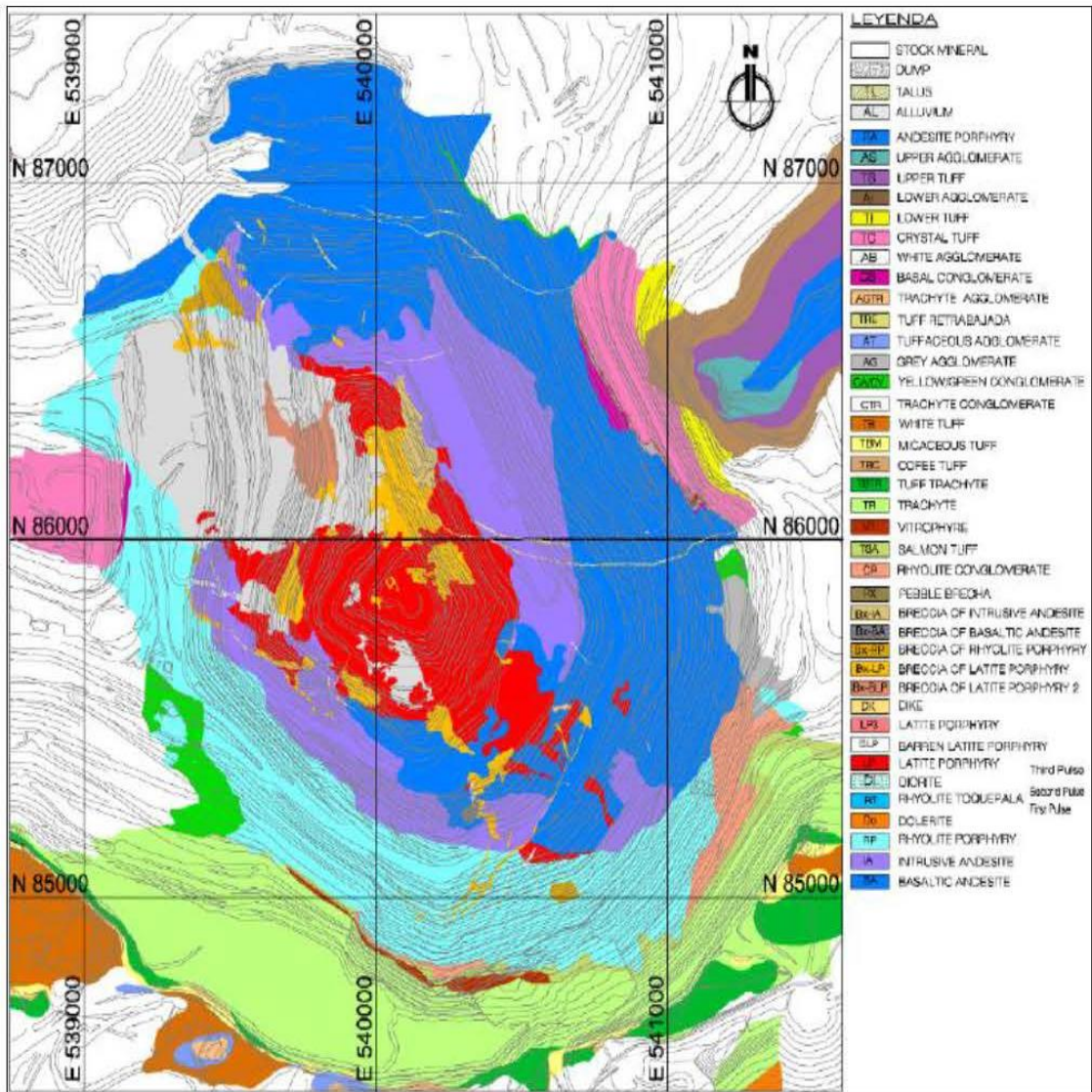
Matriz de consistencias: GESTIÓN DEL CONTROL DE VIBRACIONES EN FALLAS ACTIVAS AL IMPLEMENTAR MEJORAS EN LA VOLADURA DE ROCAS EN UNA MINA SUPERFICIAL, MOQUEGUA, 2024.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	POBLACIÓN Y MUESTRA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis General	Variable Independiente	Población
•¿Cómo influye la propuesta de mejoras en la voladura de rocas el monitorear las fallas activas al controlar las vibraciones?	•Lograr monitorear las fallas activas con la propuesta del control de las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas en una mina superficial.	•La implementación de mejoras en el diseño de voladura reduce significativamente los niveles de vibración, lo que permite un control efectivo del comportamiento de fallas activas y mejora los indicadores operativos en una mina superficial.	Vibraciones.	Para este proyecto de investigación se tendrá como población las voladuras realizadas en el año 2023.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis Específicos	Variable Dependiente	Muestra
•¿Cómo influye la propuesta de mejoras en la voladura de rocas el mejorar la fragmentación al controlar las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas?	•Determinar cómo influye las vibraciones en fallas activas el mejorar la fragmentación al implementar mejoras en la voladura de rocas.	•Es probable que al monitorear las fallas activas influya en la mejora de la fragmentación al implementar mejoras en la voladura de rocas, Moquegua, 2024.	Control de fallas activas.	Como muestra se analizarán las voladuras realizadas en la fase 8FE de los niveles 3295, 3310, 3325 de 6 meses: •Del 01-04-2023 al 30-06-2023. (Antes de iniciar la prueba) •Del 01-07-2023 al 30-09-2023. (Después de iniciar la prueba).
•¿Cómo influye la propuesta de mejoras en la voladura de rocas el mejorar factor de potencia al controlar las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas?	•Determinar cómo influye las vibraciones en fallas activas el mejorar factor de potencia al implementar mejoras en la voladura de rocas.	•Es probable que al monitorear las fallas activas influya en la mejora del factor de potencia al implementar mejoras en la voladura de rocas, Moquegua, 2024.		
•¿Cómo influye la propuesta de mejoras en la voladura de rocas el mejorar el costo de voladura al controlar las vibraciones al implementar mejoras en la voladura de rocas?	•Determinar cómo influye las vibraciones en fallas activas el mejorar el costo de voladura al implementar mejoras en la voladura de rocas.	•Es probable que al monitorear las fallas activas influya en la mejora del costo de voladura al implementar mejoras en la voladura de rocas, Moquegua, 2024.		

Nota. Se muestra matriz de consistencia

Anexo 1

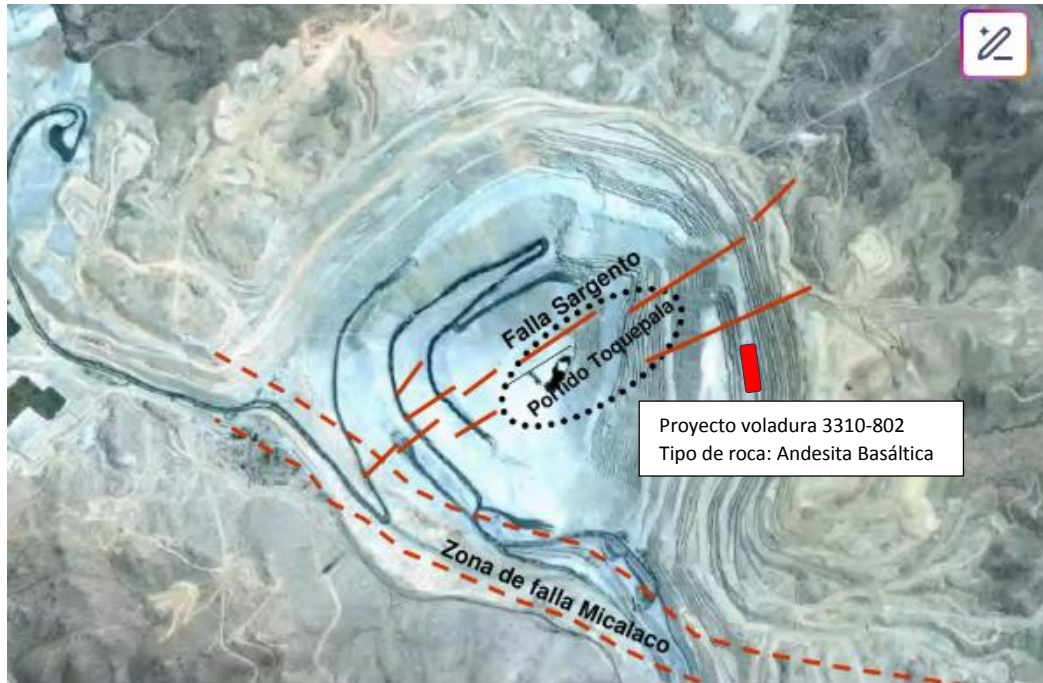
Plano Geológico de una Mina Superficial



Nota: Informe Interno Geología de una Mina Superficial, 2015.

Anexo 2

Fallas Fase 8 E



La imagen satelital muestra la configuración estructural de la fase 8 E, donde se identifican dos zonas de fallas activas de relevancia geotécnica: la Falla Sargento, que atraviesa directamente el pórfido Toquepala, y la Zona de Falla Micalaco, que bordea el extremo suroeste del tajo. La presencia de estas discontinuidades estructurales representa un riesgo significativo para la estabilidad de los taludes y el control del macizo rocoso, ya que las vibraciones generadas por las voladuras pueden inducir desplazamientos o reactivaciones sísmicas localizadas. Esta condición geológica justifica la necesidad de optimizar los parámetros de voladura y aplicar un control estricto de las vibraciones, especialmente en las áreas adyacentes a estas fallas, con el fin de preservar la seguridad operativa, reducir impactos estructurales y garantizar la continuidad de la explotación minera.

Anexo 3

Dirección de fallas



El Anexo 4 evidencia visualmente la traza superficial de una falla activa en una vía minera ubicada en la zona operativa de una Mina Superficial, correspondiente al registro del 1 de diciembre de 2023. En la imagen se observa una discontinuidad claramente marcada en el terreno, con desplazamiento diferencial del material de base, lo cual es indicativo del movimiento estructural asociado a una falla geológica. La orientación lineal de la fractura sugiere una dirección predominante de esfuerzos tectónicos activos, que afecta no solo la estabilidad del camino sino también la seguridad estructural del entorno cercano. Este tipo de evidencias refuerza la necesidad de integrar estudios estructurales detallados en el diseño de mallas de voladura y monitoreo de vibraciones, a fin de evitar la reactivación de zonas de debilidad geológica y mitigar riesgos operacionales en áreas de tránsito frecuente.

Anexo 4

Dirección de fallas



El Anexo 5 presenta una vista panorámica del tajo abierto de una Mina Superficial, capturada por INGEMMET en mayo de 2010, en la que se identifican visualmente dos estructuras geológicas mayores marcadas con líneas rojas, correspondientes a trazas de fallas activas que intersectan los bancos del lado este del pit. La presencia de estas fallas, que cortan verticalmente la secuencia de bancos, indica un riesgo potencial de inestabilidad estructural en los taludes, especialmente ante eventos detonantes como las voladuras. La orientación NE-SO de las fallas sugiere una alineación regional de esfuerzos tectónicos y refuerza la necesidad de integrar estos datos en los modelos geotécnicos para el diseño seguro de voladuras y la planificación minera. Esta evidencia gráfica resalta la vulnerabilidad geomecánica de la zona y la importancia de implementar monitoreos constantes y estrategias de control de vibraciones en áreas adyacentes a las fallas para garantizar la estabilidad del tajo y la seguridad operativa.

Anexo 5

Vista del tajo



El Anexo 6 muestra una vista general del tajo operativo de una Mina Superficial al 25 de noviembre de 2023, donde se aprecia claramente la disposición escalonada de los bancos, las vías de acarreo activas y las operaciones de carguío en curso. La imagen evidencia una operación minera a gran escala, con frentes múltiples de trabajo y condiciones geotécnicas que demandan un alto nivel de control en diseño y ejecución de voladuras. La geometría de los taludes, junto con la traza sinuosa de la vía principal, sugiere una planificación ajustada a las condiciones del terreno, posiblemente influenciada por estructuras geológicas locales o restricciones de estabilidad. Esta fotografía permite contextualizar la magnitud del tajo y su entorno, sirviendo como base visual para comprender la importancia de implementar mejoras en la voladura que consideren no solo el rendimiento operativo, sino también la seguridad en zonas próximas a fallas activas o a infraestructuras críticas.