

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

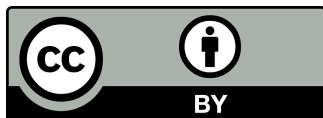
**Optimización de diseño de una malla de perforación en
la chimenea rc 72, nivel 1800 de la Cía. Minera Poderosa**

Fidencio Taipe De La Cruz
Oscar Joel Ocaña Evangelista

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decana de la Facultad de Ingeniería
DE : Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 6 de agosto de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Optimización de Diseño de una Malla de Perforación en la Chimenea rc 72, nivel 1800 de la Cía. Minera Poderosa

Autores:

1. Fidencio Taipe De La Cruz – EAP. Ingeniería de Minas
2. Oscar Joel Ocaña Evangelista – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 19 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI ☒ NO ☐
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): 9 SI ☒ NO ☐
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI ☐ NO ☒

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(NO SE MUESTRA EN ESTE DOCUMENTO POR ESTAR EXPUESTO A PUBLICACIÓN)

ASESOR

Ing. Faustino Anibal Gutierrez Dañobeitia

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme salud, sabiduría y fortaleza en cada etapa de este camino académico y profesional.

A mis padres, por su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por enseñarme que con perseverancia todo es posible.

A mi familia, por su paciencia, comprensión y apoyo constante, incluso en los momentos más difíciles.

A mis docentes y asesores, por compartir su conocimiento y guiarme con compromiso y exigencia hacia la formación profesional.

Y, especialmente, a todos los trabajadores de la Compañía Minera Poderosa, cuya labor diaria me motivó a desarrollar este estudio con responsabilidad y dedicación, con el deseo de contribuir al crecimiento de nuestra ingeniería y nuestra minería nacional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios, por haberme dado salud, constancia y claridad en los momentos clave de este proceso académico.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, por su amor, sacrificio y permanente apoyo moral y emocional a lo largo de mi formación profesional. Su ejemplo de responsabilidad y esfuerzo ha sido el motor que me ha impulsado a culminar esta etapa con compromiso y orgullo.

Agradezco a la Compañía Minera Poderosa S.A., por brindarme la oportunidad de desarrollar esta investigación en sus instalaciones, facilitando el acceso a la información técnica y operativa necesaria para el estudio. Mi reconocimiento a los ingenieros, técnicos y trabajadores de la Unidad Minera Marañón, especialmente a quienes forman parte del equipo de perforación y voladura, por su colaboración y apertura durante la recolección de datos.

A mi asesor de tesis: Ing. Faustino Aníbal Gutiérrez Dañobeitia, por su orientación, conocimientos compartidos y valiosas recomendaciones que han enriquecido esta investigación y mi desarrollo profesional.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por su entrega académica y por formar con excelencia a quienes aspiramos a contribuir con la minería responsable del país.

Finalmente, a mis compañeros y amigos de estudios, por su compañerismo, consejos y por haber sido parte fundamental de esta experiencia universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ASESOR	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	14
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Justificación e importancia.....	15
1.4. Delimitación del proyecto	17
1.5. Hipótesis y variables	18
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20
2.1. Antecedentes de la investigación	20
2.2. Generalidades de la Unidad Minera Maraón	24
2.3. Bases teóricas.....	37
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	40
3.1. Métodos y alcances de la investigación 3.1.1. Método general	40
3.2. Población y muestra.....	42
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	43
3.4. Técnicas utilizadas en la recolección de datos.....	43
3.5. Instrumentos utilizados en la recolección de datos	44
3.6. Aporte del estudio a la ingeniería de minas y a la operación minera.....	44
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1. Presentación de resultados	46
4.2. Discusión de resultados.....	60
4.3. Contrastación de hipótesis	62
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
5.1. Conclusiones	64
5.2. Recomendaciones	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definición de componentes de las mallas de perforación y voladura.....	38
Tabla 2. Definición de componentes del factor de avance.....	38
Tabla 3. Parámetros de perforación y voladura, galería - Nv 1800, Unidad Minera Marañón.....	47
Tabla 4. Parámetros de perforación y voladura, chimenea RC - 72, Unidad Minera Marañón.....	49
Tabla 5. Resumen de parámetro de perforación y voladura, en galería y chimenea.....	50
Tabla 6. Análisis de fragmentación galería Nivel 1800.....	52
Tabla 7. Análisis de fragmentación en chimenea RC 72 - Nivel 1800.....	55
Tabla 8. Relación de granulometría y avance en chimeneas – Nivel 1800.....	57
Tabla 9. Validación de la hipótesis en la chimenea RC 72 – Nivel 1800.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la mina Poderosa	25
Figura 2. Geología regional de U.M. Poderosa.....	27
Figura 3. Geología local de U.M. Poderosa	29
Figura 4. Minerales de la U.M. Poderosa	31
Figura 5. Cartilla geomecánica, labores de explotación y avance	33
Figura 6. Cartilla geomecánica en relación al tipo de sostenimiento.....	33
Figura 7. Relación avance con pies perforados en Galería – Nivel 1800	48
Figura 8. Relación avance con factor de potencia en Galería – Nivel 1800	48
Figura 9. Relación avance con pies perforados en chimenea RC 72 – Nivel 1800	50
Figura 10. Relación avance con factor de potencia en chimenea RC 72 – Nivel 1800	50
Figura 11. Análisis de granulometría en galería Nivel 1800	52
Figura 12. Tamaño de distribución en galería – Nivel 1800.....	53
Figura 13. Análisis de la granulometría en galería, mediante software Wipfrag 3.3	54
Figura 14. Posvoladura en chimenea RC 72, Unidad Maraón	54
Figura 15. Tamaño de distribución en chimenea RC 72	56
Figura 16. Análisis de la granulometría chimenea RC 72, mediante software Wipfrag 3.3	56
Figura 17. Relación avance, P80 y consumo de explosivo en chimeneas	58
Figura 18. Relación avance, factor de potencia y finos en chimeneas.....	58
Figura 19. Relación avance total, P80 y liquidación en chimenea.....	59
Figura 20. Relación avance total, P80 y liquidación en chimenea.....	59

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo optimizar los procesos de perforación y voladura mediante el rediseño de la malla de perforación en la Chimenea RC 72, ubicada en el nivel 1800 de la veta Choloque, en la Compañía Minera Poderosa S.A. Actualmente, las labores de desarrollo presentan limitaciones operativas evidenciadas en un bajo avance lineal, sobreroturas frecuentes, tiros fallados y una granulometría deficiente, lo que genera mayores costos operacionales y riesgos en la seguridad del personal. Para abordar este problema, se plantea una investigación de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño cuasi experimental. Se utilizarán métodos deductivos y analíticos para evaluar el impacto del nuevo diseño de malla en los costos operativos y la calidad del ciclo de minado. La recolección de datos se realizará mediante observación directa, entrevistas a operarios y análisis técnico con software especializado como AutoCAD y Split Desktop. Como sustento, se consideran antecedentes relevantes desarrollados en la misma empresa minera. Yucra (2022) logró reducir significativamente los costos de operación mediante el rediseño de la malla en la galería San Fernando (1). Chipana (2022) demostró mejoras en la recuperación de pilares y reducción de dilución en el Tajo 6520 mediante una malla optimizada (2). Silva (2023) implementó tecnología láser para el marcado de mallas y obtuvo avances notables en indicadores de perforación y voladura (3). Estos estudios evidencian que la adecuada selección de parámetros como burden, espaciamiento, longitud de taladro y carga explosiva puede incrementar la eficiencia operativa y reducir desperdicios. Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan a establecer un estándar técnico en el diseño de mallas de perforación en la unidad minera, mejorando la eficiencia del ciclo de minado, reduciendo costos y aumentando la seguridad operativa. Además, se busca brindar una base metodológica para la replicación de este tipo de estudios en otras labores similares dentro de la Compañía Minera Poderosa.

Palabras clave: malla de perforación, voladura, optimización, costos operativos, minería subterránea.

ABSTRACT

This research aims to optimize drilling and blasting processes through the redesign of the drilling pattern in Chimney RC 72, located at Level 1800 of the Choloque Vein, in Compañía Minera Poderosa S.A. Currently, the development work faces operational limitations such as low linear advance, frequent overbreaks, misfires, and poor fragmentation. These issues increase operational costs and pose safety risks to personnel. To address this problem, an applied research approach with a quantitative, explanatory, and quasi-experimental design is proposed. Deductive and analytical methods will be used to evaluate the impact of the new drilling pattern on operational costs and the quality of the mining cycle. Data collection will involve direct observation, unstructured interviews with operators, and technical analysis using specialized software such as AutoCAD and Split Desktop. Relevant studies developed within the same mining company are considered as key references. Yucra (2022) significantly reduced operational costs by redesigning the drilling pattern in the San Fernando Gallery. Chipana (2022) demonstrated improvements in pillar recovery and dilution control in Stope 6520 using optimized designs. Silva (2023) implemented laser-based pattern marking, resulting in improved drilling and blasting performance indicators. These studies show that selecting proper parameters such as burden, spacing, hole length, and explosive charge significantly enhances operational efficiency and reduces waste. The expected outcomes of this research aim to establish a technical standard for drilling pattern design within the mining unit, improving the mining cycle efficiency, reducing costs, and increasing operational safety. Furthermore, this work will provide a methodological basis for replicating similar studies across other work areas within Compañía Minera Poderosa.

Keywords: drilling pattern, blasting, optimization, operational costs, underground mining, Compañía Minera Poderosa.

.

INTRODUCCIÓN

En la minería subterránea, los procesos de perforación y voladura son cruciales para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la reducción de costos en las labores mineras. Un aspecto fundamental en estas operaciones es el diseño de la malla de perforación, que determina la disposición y el espaciamiento de los taladros de perforación, lo cual influye de manera directa en la calidad de la voladura, la fragmentación de la roca y los costos asociados. Un diseño inadecuado de la malla puede generar una serie de problemas operacionales, tales como una fragmentación deficiente, sobre costos por mal rendimiento de las voladuras, y mayores riesgos para los trabajadores.

Este estudio tiene como objetivo optimizar el diseño de la malla de perforación de la Chimenea RC 72, ubicada en el nivel 1800 de la veta Choloque, en la Compañía Minera Poderosa S.A., con el fin de mejorar los parámetros de perforación y voladura. Se plantea una revisión y rediseño del sistema de perforación, utilizando herramientas tecnológicas avanzadas, para aumentar la eficiencia en la operación, mejorar la fragmentación de la roca y reducir los costos operacionales.

La investigación se estructura en cinco capítulos, los cuales se detallan a continuación:

- Capítulo I: Planteamiento del estudio: en este capítulo se presenta el contexto general del estudio, incluyendo la identificación del problema, los objetivos de la investigación, la justificación y la delimitación del estudio.
- Capítulo II: Marco teórico: aquí se aborda el marco conceptual relacionado con los procesos de perforación y voladura en minería, así como los antecedentes y teorías previas que sustentan la investigación.
- Capítulo III: Metodología: se detallan los procedimientos y técnicas empleadas para llevar a cabo la investigación, incluyendo el análisis de las variables geomecánicas, la recopilación de datos, y el uso de herramientas como AutoCAD y Split Desktop.
- Capítulo IV: Resultados y discusión: en este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la nueva malla de perforación, acompañados de un análisis detallado sobre su impacto en la eficiencia y los costos operacionales.

- Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones: finalmente, se exponen las conclusiones derivadas de la investigación, así como las recomendaciones para la implementación de mejoras en otras áreas de la operación minera y en futuros proyectos similares.

La presente investigación busca proporcionar soluciones prácticas y viables para optimizar el diseño de la malla de perforación en la minería subterránea, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados, contribuyendo así al desarrollo sostenible de las operaciones mineras.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Para reducir los costos de los trabajos de desarrollo, se determinó realizar la presente investigación y así optimizar los costos y establecer estándares de perforación y voladura.

Al realizar los trabajos en las labores de desarrollo de la unidad minera se descubrieron resultados no óptimos en los avances lineales porque no había una malla de perforación estándar y los perforistas realizaban su trabajo de manera empírica. Como resultado, había taladros cargados con explosivos que no detonaban, conocidos como tiros cortados o tiros fallados. Además, se observó que los resultados de la granulometría eran muy finos y las sobreroturas eran muy constantes debido a la cantidad de explosivos empleados en el frente para fracturar la roca. Esto hace más difícil llevar a cabo la limpieza del frente y requiere más tiempo, lo que afecta negativamente el cumplimiento del ciclo de minado.

El diseño de la malla de perforación, la elección de la carga explosiva y el control de tiempos son cruciales para optimizar los costos de perforación y voladura en operaciones de minado subterráneo.

1.1.1. Problema general

¿Cómo podemos optimizar los procesos de perforación y voladura mediante el rediseño de la malla de perforación y la carga en la chimenea RC 72?

1.1.2. Problemas específicos

- a) ¿Cómo influye el consumo de explosivos en el avance efectivo de la chimenea RC 72, nivel 1800?

- b) ¿Cuál es el impacto de los finos generados por las voladuras en el avance efectivo de la chimenea RC 72, nivel 1800?
- c) ¿Cómo afecta la cantidad de explosivos utilizados en la eficiencia del avance efectivo en la chimenea RC 72, nivel 1800?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Optimizar el diseño de la malla de perforación en la chimenea RC 72, nivel 1800, de la Compañía Minera Poderosa S. A., con el fin de mejorar la eficiencia de los procesos de perforación y voladura.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Establecer la relación entre el consumo de explosivos con el avance efectivo en la chimenea RC 72, nivel 1800 de la Compañía Minera Poderosa S. A.
- b) Estudiar cómo los finos derivados de la voladura impactan en el avance efectivo de la chimenea RC 72, nivel 1800, de la Compañía Minera Poderosa S. A.
- c) Determinar el impacto de la cantidad de explosivo utilizado en el avance efectivo en la chimenea RC 72, nivel 1800, de la Compañía Minera Poderosa S.A.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

La optimización de los procesos de perforación y voladura en el sector minero es un tema de vital importancia, ya que estos procesos son determinantes para la eficiencia en la explotación de recursos, impactando directamente en los costos operativos y la productividad. La Compañía Minera Poderosa S. A., al ser una de las principales empresas en el sector minero, enfrenta desafíos continuos relacionados con la mejora en la eficiencia de sus procesos productivos, especialmente en lo que respecta a la perforación y voladura en sus chimeneas y túneles.

En particular, la chimenea RC 72, ubicada en el nivel 1800 de la mina, presenta desafíos específicos que requieren una evaluación y optimización de los parámetros de perforación y voladura, con el fin de mejorar el avance efectivo y reducir los costos operativos. La eficiencia

de estos procesos depende de múltiples factores, tales como la elección de la malla de perforación, el consumo de explosivos, el factor de potencia y la generación de finos durante las voladuras (4).

Según estudios previos, una adecuada optimización del diseño de la malla de perforación y la carga de explosivos puede mejorar significativamente el rendimiento de los avances en las labores mineras, lo que se traduce en una reducción de los tiempos de ejecución y una mayor rentabilidad para la empresa (5). En este contexto, se ha identificado que el factor de potencia y la cantidad de explosivos utilizados en las voladuras son factores clave que influyen en el desempeño de los procesos de perforación y voladura, afectando tanto la estabilidad de las galerías como la producción de material útil (6).

Por otro lado, la generación de finos, producto de las voladuras, puede representar un desafío adicional para las operaciones mineras, ya que los finos no son solo un subproducto no deseado, sino que también afectan la eficiencia del proceso de carguío y transporte del mineral. Reducir la cantidad de finos generados es crucial para mejorar el rendimiento general de la mina y minimizar las pérdidas de material valioso (7).

La relevancia de este estudio radica en que, a través de la optimización de los procesos de perforación y voladura en la chimenea RC 72, se pueden obtener beneficios significativos, tanto en términos de reducción de costos como de mejora en la calidad del avance. La investigación permitirá generar un marco metodológico y operativo aplicable a otras áreas de la mina, contribuyendo a la mejora continua de los procesos productivos en la Compañía Minera Poderosa S.A.

Este estudio tiene también una importancia técnica, ya que la correcta aplicación de las técnicas de optimización en los procesos de perforación y voladura puede servir como modelo para otras empresas mineras que enfrentan desafíos similares en la optimización de sus operaciones. Así, se busca proporcionar a la industria herramientas prácticas y basadas en evidencia que mejoren la eficiencia, seguridad y rentabilidad de las operaciones subterráneas en el sector minero.

1.3.2. Importancia

La presente investigación reviste gran importancia técnica, económica y académica, ya que se centra en la optimización del diseño de la malla de perforación en la chimenea RC 72, nivel 1800 de la Compañía Minera Poderosa S. A., una labor crítica en la operación minera subterránea. La correcta elección de los parámetros de perforación y voladura permite

maximizar el rendimiento del avance, minimizar el sobreconsumo de explosivos y reducir los costos operacionales, lo que es esencial para mantener la competitividad de una unidad minera (8).

En el plano técnico, el desarrollo de una malla de perforación adecuada influye directamente en la fragmentación del macizo rocoso, la estabilidad de la labor y la eficiencia en la evacuación del material roto. Una voladura bien diseñada mejora el factor de potencia y reduce la generación de finos, lo que permite avances más limpios y seguros (9). Este aspecto cobra mayor relevancia en trabajos verticales como chimeneas, donde los riesgos operacionales son mayores y las tolerancias deben ser más estrictas.

Desde el punto de vista económico, la optimización del proceso de perforación y voladura contribuye significativamente a la disminución de costos por metro perforado, mejorando el aprovechamiento del explosivo y reduciendo retrabajos y tiempos muertos. Según Ramos y Medina (10), la mejora en los parámetros de voladura puede generar ahorros de hasta un 15 % en los costos totales de desarrollo en minas subterráneas.

Asimismo, la investigación aporta al ámbito académico al generar conocimientos aplicados sobre las buenas prácticas en el diseño de mallas de perforación en labores verticales, constituyendo un valioso material de referencia para ingenieros en formación, así como para profesionales del rubro minero que buscan implementar mejoras continuas en sus operaciones. Además, el estudio establece una metodología replicable que puede adaptarse a otras condiciones geomecánicas y operativas (11).

Finalmente, en un contexto donde la minería debe orientarse hacia prácticas más sostenibles y responsables, la optimización de procesos clave como la perforación y voladura permite una operación más eficiente, segura y con menor impacto ambiental, contribuyendo a los objetivos estratégicos del desarrollo minero en el Perú (12).

1.4. Delimitación del proyecto

La presente investigación se circunscribe a un entorno técnico-operativo específico dentro del contexto de la minería subterránea, enfocándose en la optimización del diseño de la malla de perforación y la carga explosiva en la chimenea RC 72, ubicada en el nivel 1800 de la Compañía Minera Poderosa S.A., durante el año 2024.

- Delimitación espacial

El estudio se desarrolla exclusivamente en las instalaciones subterráneas de la unidad minera de la Compañía Minera Poderosa S. A., específicamente en la chimenea RC 72. No se consideran otras chimeneas, frentes de trabajo o niveles distintos al 1800.

- **Delimitación temporal**

La investigación abarca un periodo comprendido entre enero y diciembre del año 2024, tiempo durante el cual se recopiló la información técnica, se evaluaron los parámetros de perforación y voladura, y se validaron los resultados del nuevo diseño propuesto.

- **Delimitación temática**

El enfoque temático está orientado exclusivamente al diseño y análisis de una malla de perforación, incluyendo aspectos relacionados con el consumo de explosivos, el factor de potencia, el control de finos generados por voladura, y el avance efectivo. No se abordan otros procesos mineros como sostenimiento, ventilación o manejo de agua, salvo cuando resulten relevantes para la comprensión del diseño de la voladura.

- **Delimitación metodológica**

La investigación se basa en un enfoque cuantitativo, empleando el método analítico-descriptivo y correlacional, a través del análisis de variables técnicas y operativas. Se utilizaron datos reales de campo, registros de avance, consumo de explosivos y evaluación geomecánica, complementados con bibliografía técnica especializada.

1.5. Hipótesis y variables

1.5.1. Hipótesis general

El rediseño de la malla de perforación y carga en la chimenea RC 72, nivel 1800, de la Cía. Minera Poderosa S. A. permite optimizar el avance efectivo y mejorar la eficiencia del proceso de voladura.

1.5.2. Hipótesis específicas

- a) La variación del consumo de explosivos influye significativamente en el avance efectivo de la chimenea RC 72, nivel 1800.
- b) La disminución de finos generados por la voladura mejora el rendimiento del avance y reduce los costos operativos en la chimenea RC 72, nivel 1800.

- c) La adecuada dosificación del explosivo en la nueva malla de perforación contribuye a una mayor eficiencia en el proceso de voladura y un avance más uniforme en la chimenea RC 72, nivel 1800.

1.5.3. Variables

- Variable dependiente

Diseño de la malla de perforación y carga

- **Variable independiente**

Avance efectivo en la chimenea RC 72

Rendimiento operativo del proceso de perforación y voladura

Calidad del macizo fragmentado (finos generados)

Optimización de los costos operativos asociados a la voladura

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

- Kambasha y Moyo (2020) realizaron un estudio exhaustivo sobre la optimización de los parámetros de perforación y voladura para mejorar la recuperación de mineral y la eficiencia de costos en minería subterránea. En este trabajo, se propuso un enfoque integrado que ajusta la malla de perforación y la carga explosiva con base en el análisis de las propiedades geotécnicas del yacimiento. Los resultados indicaron que la optimización de estos parámetros no solo mejora la eficiencia en la fragmentación del mineral, sino que también reduce significativamente los costos operativos. Además, se destacó la importancia de las simulaciones numéricas como herramienta crucial para modelar los efectos de diferentes configuraciones de voladura antes de la implementación en campo. Este estudio tiene relevancia para operaciones mineras que enfrentan desafíos similares en términos de reducción de costos y mejora en la productividad de la perforación. Los investigadores también subrayan que un control adecuado de la energía de voladura y el análisis detallado de las propiedades mecánicas de las rocas son elementos esenciales para maximizar el rendimiento operativo (13).
- Barrientos y Díaz (2018) llevaron a cabo un estudio detallado sobre cómo el diseño de la voladura afecta el rendimiento de la perforación y la eficiencia operativa en la mina subterránea El Teniente en Chile. En este caso, los autores se centraron en la mejora de las técnicas de perforación, optimizando tanto la carga explosiva como la geometría de la malla. Se demostró que un diseño adecuado de la voladura no solo mejora el avance de perforación, sino también aumenta la seguridad y reduce las vibraciones, lo que minimiza el impacto en las estructuras adyacentes. El análisis incluyó el uso de simulaciones para evaluar el

comportamiento de la roca bajo diferentes condiciones de voladura, lo que permitió ajustar el diseño de la malla para mejorar la fragmentación. Este trabajo contribuyó a la implementación de mejores prácticas en la minería subterránea, destacando la relación directa entre el diseño de voladuras y la reducción de costos operativos. Además, Barrientos y Díaz sugirieron que los avances tecnológicos en equipos de perforación y explosivos podrían ser aprovechados para mejorar la eficiencia de los procesos mineros subterráneos (14).

- Liu, Zhang y Ma (2021) realizaron un estudio sobre la aplicación de la optimización de perforación y voladura en minería a cielo abierto en una mina en el norte de China. El objetivo principal del estudio fue reducir el consumo de explosivos y mejorar la fragmentación del mineral en las voladuras de banco. Para ello, se implementaron simulaciones y análisis geomecánicos para ajustar los parámetros de perforación, como la distancia entre perforaciones y la cantidad de carga explosiva utilizada. Los resultados demostraron que un diseño optimizado de la malla de perforación y una correcta selección de explosivos llevaron a una mejora significativa en la fragmentación del mineral, lo que facilitó el proceso de carga y transporte. Además, el estudio evidenció que la reducción de la carga explosiva no solo disminuyó los costos operativos, sino que también redujo los impactos ambientales de las operaciones mineras, como las emisiones de polvo y vibraciones. Este caso resalta la importancia de los modelos computacionales para predecir los resultados de las voladuras y guiar las decisiones de diseño en terrenos complejos, lo cual es aplicable a otras operaciones de minería a cielo abierto (15).
- Malmgren y Andersson (2019) presentaron un estudio sobre la optimización de las operaciones de perforación y voladura en la región escandinava, con énfasis en la mejora de la eficiencia minera en condiciones geológicas complejas. Los investigadores utilizaron un enfoque multidimensional para evaluar los efectos de diferentes configuraciones de perforación y carga explosiva, con el fin de mejorar la eficiencia en la fragmentación y reducir el tiempo de inactividad de las operaciones. Los resultados mostraron que la combinación adecuada de malla de perforación y explosivos optimizó el avance de perforación y redujo significativamente los costos operativos relacionados con la limpieza y extracción de material. El estudio también abordó la influencia de las características geológicas y la variabilidad de las rocas en el diseño de la voladura, sugiriendo que la adaptabilidad a estas condiciones es esencial para lograr un rendimiento óptimo. Además, se destacó la implementación de nuevas tecnologías en equipos de perforación y el uso de simulaciones avanzadas como herramientas clave en la toma de decisiones operativas. El trabajo enfatizó la importancia de una planificación detallada en la fase inicial del diseño de

perforación para maximizar los beneficios a largo plazo de la optimización de estos procesos (16).

2.1.2. Antecedentes nacionales

- Arévalo (2021) presentó una solución integral para optimizar los procesos de perforación y voladura en la Unidad San Cristóbal. Utilizando un enfoque basado en el análisis de las propiedades geomecánicas de las rocas, el estudio permitió ajustar la malla de perforación y la cantidad de explosivos de acuerdo con los tipos de rocas presentes. Se identificó que la dureza de la roca y su grado de fracturación son determinantes para la selección de las cargas explosivas y el diseño de la malla. A través de simulaciones y análisis de rendimiento, se concluyó que la fragmentación obtenida con la malla optimizada permitió no solo mejorar el avance de las chimeneas, sino también reducir los costos operativos relacionados con la remoción de material y las intervenciones adicionales de limpieza. Este enfoque se destacó por ser un modelo adaptable, que podría implementarse en otros frentes de la mina con características similares. Finalmente, se demostró que la reducción de los excesos en fragmentación tiene un impacto positivo en la seguridad del personal y en la eficiencia operativa. Las técnicas empleadas también pudieron replicarse en otras minas de la región con características geológicas similares, promoviendo una mayor eficiencia operativa. El estudio resalta la importancia de la simulación y la planificación de perforaciones más precisas para reducir tiempos y costos de operación. Además, se subrayó el valor de la formación continua de los operarios para mejorar la correcta ejecución de las técnicas y metodologías propuestas (17).
- El estudio realizado por Huamán (2019) se centró en la optimización de las operaciones de perforación y voladura en una de las unidades más productivas de la región, Santa María. A través de un exhaustivo análisis de los parámetros geotécnicos y los tipos de explosivos utilizados, se identificaron las principales áreas de mejora en el proceso. El autor encontró que, al modificar la malla de perforación y ajustar la carga explosiva según las características del terreno, se logró no solo un aumento en el avance de las chimeneas, sino también una mejora en la eficiencia de la voladura. Además, Huamán Soto destacó que un aspecto clave fue la inclusión de parámetros adicionales, como la geología del lugar, la humedad de la roca y su elasticidad, factores que no habían sido considerados adecuadamente en estudios anteriores. Como resultado de este rediseño, la empresa logró reducir considerablemente el tiempo de inactividad, los costos operativos y las intervenciones necesarias para la limpieza y remoción de material sobrante, lo que también contribuyó a un menor impacto ambiental. El estudio hizo énfasis en la relación directa entre la selección adecuada de explosivos y la

reducción de costos operativos. Además, se resaltó la importancia de implementar modelos predictivos en el diseño de mallas de perforación para mejorar los resultados operacionales. La validación de estos resultados con datos obtenidos en campo dio un respaldo fuerte al rediseño propuesto (18).

- Cáceres (2020) aborda la optimización del ciclo de perforación y voladura en la chimenea 210 de la unidad Parcoy, uno de los proyectos más complejos de Compañía Minera Poderosa S. A. Este estudio es relevante, ya que se centró en la mejora de la productividad y la reducción de costos mediante el ajuste de la malla de perforación y la optimización de los parámetros de carga explosiva. Se usaron modelos matemáticos avanzados y simulaciones computacionales para prever los efectos de diferentes configuraciones de malla y carga en la eficiencia de la perforación. Los resultados indicaron que la reducción de las vibraciones durante las voladuras y el control del tamaño de la fragmentación contribuyeron a una mayor seguridad operativa y a una optimización del uso de los recursos explosivos. Cáceres Meléndez subraya la importancia de ajustar el proceso en función de las características geológicas específicas del terreno, señalando que la personalización de cada proceso de voladura según las condiciones locales puede generar una mejora significativa en el rendimiento de las operaciones subterráneas. Además, el estudio refuerza la necesidad de incorporar herramientas de simulación computacional más robustas para garantizar una correcta predicción de los resultados operacionales. La investigación también destaca que, aunque los costos iniciales de implementación de nuevas tecnologías pueden ser altos, el retorno de inversión a largo plazo es considerablemente positivo. La aplicación de los resultados en el campo permitió una reducción de costos operacionales sin comprometer la seguridad y eficiencia (19).
- Vallejos (2022) profundiza en el rediseño de la malla de perforación en la unidad Mallay con el objetivo de mejorar los costos de producción y aumentar la eficiencia operativa en minería subterránea. El estudio se centra en la importancia de ajustar el diseño de perforación de acuerdo con las propiedades de las rocas y las condiciones geomecánicas del lugar, lo que resulta esencial para mejorar la fragmentación y reducir el uso de explosivos. Vallejos también aborda la importancia de las simulaciones numéricas como herramienta fundamental en el rediseño de mallas, ya que permiten evaluar diferentes escenarios antes de aplicar cualquier cambio en el campo. Una de las principales conclusiones fue que un diseño adecuado de la malla no solo optimiza los costos de producción, sino que también mejora la seguridad del proceso, reduciendo el riesgo de accidentes asociados a voladuras incontroladas. Asimismo, el estudio subraya que la capacitación continua del personal es crucial para asegurar que los cambios en los diseños de perforación sean implementados

correctamente y de forma eficiente. Vallejos también destacó que la implementación de tecnología avanzada en el proceso de perforación y voladura tiene un alto impacto en la reducción de los costos operativos en el largo plazo. Además, se señaló que la correcta planificación y ejecución de los diseños de perforación resulta en una mejora sustancial en la estabilidad de las galerías, lo que mejora la seguridad y optimiza el ciclo de trabajo. La investigación propone estrategias clave para replicar estos resultados en otras unidades mineras que busquen mejorar sus procesos de voladura (20).

2.2. Generalidades de la Unidad Minera Marañón

2.2.1. Ubicación e infraestructura disponible

La Unidad Minera Marañón, operada por la Compañía Minera Poderosa S.A., se encuentra ubicada en el caserío de Vijus, dentro del distrito y provincia de Pataz, en el departamento de La Libertad, Perú. Esta zona forma parte del Cuadrángulo de Pataz, una región de alta actividad metalogénica, caracterizada por la presencia de vetas auríferas angostas de tipo cuarzo con sulfuros, emplazadas en el Batolito de Pataz.

La unidad se sitúa en una zona montañosa con altitudes que oscilan entre los 1,250 y 3,000 metros sobre el nivel del mar, lo que representa un reto logístico para las operaciones, pero también una ventaja geológica por la riqueza mineral del subsuelo.

En cuanto a infraestructura, la Unidad Minera Marañón cuenta con:

- Planta de beneficio Marañón, con capacidad de procesamiento de hasta 960 toneladas métricas por día (TMD).
- Sistema de explotación subterránea, mediante galerías y rampas que permiten el acceso a las vetas auríferas.
- Campamentos mineros para el alojamiento del personal técnico y operativo.
- Red vial interna que conecta las distintas áreas de operación, facilitando el transporte de mineral y personal.
- Sistema eléctrico y de comunicaciones, adaptado a las condiciones geográficas de la zona.
- Infraestructura ambiental, que incluye plantas de tratamiento de aguas residuales, sistemas de monitoreo ambiental y programas de gestión de residuos.
- Centro de control y monitoreo, que permite supervisar en tiempo real las operaciones mineras y los parámetros ambientales.

Esta infraestructura permite a la Unidad Minera Marañón operar de manera eficiente y sostenible, cumpliendo con los estándares técnicos y ambientales exigidos por la normativa peruana.



Figura 1. Ubicación de la mina Poderosa

2.2.2. Accesibilidad

El acceso a esta mina se realiza principalmente por vía terrestre, combinando tramos asfaltados y trochas carrozables.

El punto de partida más común es la ciudad de Trujillo, capital del departamento de La Libertad. Desde esta ciudad, se toma la carretera Panamericana Norte hasta llegar al desvío de Shirán, continuando por la carretera Trujillo–Huamachuco–Tayabamba, pasando por localidades como Otuzco y Huamachuco. Este trayecto es mixto, presentando secciones asfaltadas y otras de trocha afirmada, especialmente en el tramo comprendido entre Huamachuco y Tayabamba.

Desde Tayabamba, se accede a la unidad minera a través de una vía afirmada que conecta directamente con las instalaciones de la Compañía Minera Poderosa. Esta vía es transitable por vehículos 4x4 y camionetas de transporte minero, siendo usada regularmente para el traslado de personal, insumos y materiales.

Durante la época de lluvias, las condiciones de acceso pueden tornarse más difíciles debido a derrumbes o huaicos en los tramos de trocha, por lo que la compañía cuenta con un sistema de monitoreo y mantenimiento constante de sus rutas de ingreso para garantizar la seguridad y operatividad.

2.2.3. Geología regional

La Unidad Minera La Poderosa se encuentra emplazada dentro de la provincia geológica del Macizo Norandino, específicamente en el batolito de Pataz, una de las formaciones geológicas más importantes de la cordillera oriental del norte peruano. Este batolito está compuesto mayormente por intrusivos de composición granodiorítica y tonalítica del Cretácico superior, que han afectado a las rocas sedimentarias del Paleozoico y del Mesozoico (21).

El batolito de Pataz es reconocido por su potencial aurífero en vetas hidrotermales epitermales, alojadas en su mayoría en diques subverticales de cuarzo y estructuras de cizalla. La actividad mineralizante se asocia a soluciones hidrotermales de baja sulfuración que precipitaron oro libre y sulfuros en sistemas de vetas de dirección preferente noroeste-sureste (22). Estas vetas presentan una notable continuidad y potencia, haciendo de esta región una de las más importantes en producción aurífera del país.

Los estudios geológicos regionales han identificado además la presencia de fajas de cizallamiento regionales, como la falla de Pataz, que actúan como controles estructurales principales en la ubicación de los cuerpos mineralizados. Estas estructuras tectónicas han permitido la migración de fluidos hidrotermales y la concentración de minerales económicos en zonas específicas (23).

Asimismo, la geología regional muestra una secuencia de rocas metamórficas del complejo Maraón, superpuestas por secuencias sedimentarias de la formación Chicama y la formación Farrat. Estas unidades fueron posteriormente intruidas por el batolito y han sufrido procesos de alteración hidrotermal, generando zonas propicias para la formación de depósitos tipo vetiformes.

En resumen, la geología regional que alberga la Unidad Minera La Poderosa constituye un entorno favorable para la formación de depósitos de oro en vetas epitermales, debido a la combinación de factores estructurales, litológicos y tectónicos propios del batolito de Pataz y sus alrededores.

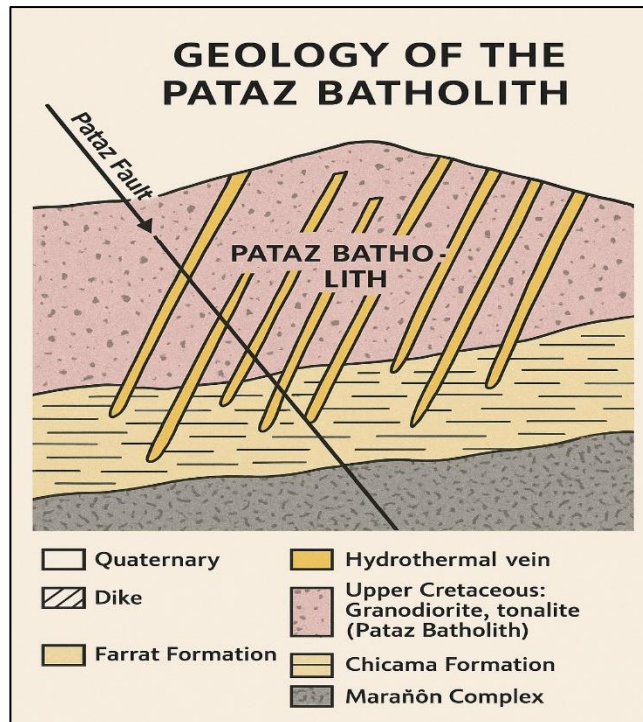


Figura 2. Geología regional de U.M. Poderosa

2.2.4. Geología local

La Unidad Minera Poderosa se encuentra emplazada dentro del batolito de Pataz, un cuerpo intrusivo de gran envergadura que forma parte del cinturón magmático del norte del Perú. Este batolito está compuesto predominantemente por granodioritas y dioritas cuarzosas del Jurásico superior al Cretácico inferior. Estas rocas intruyen a un basamento sedimentario paleozoico que incluye unidades metamorfoseadas y plegadas, como las formaciones Excelsior y Santa, constituidas principalmente por pizarras, filitas y esquistos de origen marino.

En la geología local, destacan varias formaciones litológicas relevantes:

- **Formación Santa:** se presenta en el basamento y está conformada por secuencias de filitas grisáceas y pizarras, con intercalaciones de cuarcitas. Esta formación actúa como roca caja en algunas zonas del distrito minero y es relevante por su comportamiento mecánico en labores subterráneas.
- **Formación Excelsior:** conformada principalmente por esquistos micáceos, cuarcitas y filitas, esta formación ha sido afectada por el intrusivo granodiorítico, desarrollando zonas de alteración propilítica y silicificación en sus contactos.
- **Batolito de Pataz:** representa la litología predominante en la zona de la mina. Su composición es mayoritariamente granodiorítica, con estructuras de foliación magmática y

fracturas subparalelas al buzamiento de las vetas. La presencia de enclaves máficos y diques de aplita y pegmatita es común.

- Diques andesíticos y lamprófidos: se encuentran cortando a las rocas intrusivas y al basamento, formando estructuras delgadas, pero de importancia geo-estructural, ya que marcan zonas de debilidad donde se concentran esfuerzos tectónicos o hidrotermales.

La zona de la chimenea RC 72, ubicada en el nivel 1800, presenta características estructurales dominadas por fracturamiento intenso, diaclasas abiertas y zonas de fallamiento. Estas condiciones geológicas condicionan tanto el diseño de la malla de perforación como la eficiencia en la fragmentación del macizo rocoso durante la voladura.

En cuanto a estructura, el sistema de fallas predominante es de rumbo NO-SE, con direcciones subsidiarias NE-SO y N-S. Estas estructuras están estrechamente asociadas con la mineralización aurífera y han servido como conductos para fluidos hidrotermales. Las vetas de cuarzo aurífero presentan orientaciones preferenciales controladas por estas fallas y son el principal objetivo de explotación.

Desde el punto de vista mineralógico, las vetas contienen cuarzo, pirita, arsenopirita, galena y en menor medida esfalerita y calcopirita. La alteración hidrotermal más común es la silicificación intensa en el núcleo de las vetas, rodeada de halos de alteración propilítica y argílica, lo que incide en la competencia del macizo rocoso y requiere criterios técnicos específicos para la perforación, diseño de malla y carga de explosivos.

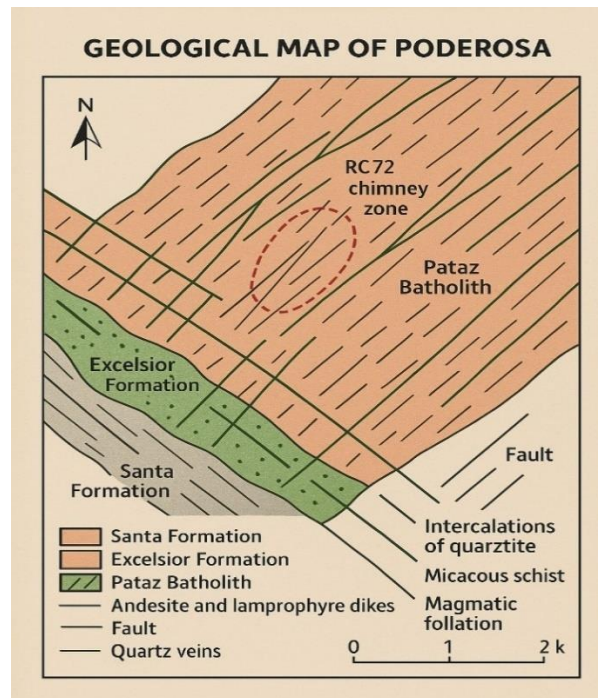


Figura 3. Geología local de U.M. Poderosa

2.2.5. Mineralogía

La mineralogía del yacimiento explotado por la Compañía Minera Poderosa S. A. está caracterizada principalmente por la presencia de minerales auríferos alojados en vetas de cuarzo de origen hidrotermal. Estas vetas se encuentran emplazadas en estructuras tectónicas con orientación predominante N-S y buzamiento hacia el este, presentando un espesor variable que va desde pocos centímetros hasta más de un metro, lo que condiciona el método de explotación y el diseño de la malla de perforación.

- **Minerales principales**

Los principales minerales metálicos presentes en la zona de estudio son:

- Oro nativo (Au): se presenta en forma libre, visible en fracturas del cuarzo o asociado íntimamente con sulfuros, especialmente pirita. El oro ocurre también en inclusiones microscópicas dentro de minerales portadores, principalmente en pirita y arsenopirita.
- Pirita (FeS_2): es el mineral sulfurado más abundante. Se encuentra en formas euhedrales bien desarrolladas, diseminadas en la matriz de cuarzo o formando agregados masivos. Actúa como portador principal del oro submicroscópico.
- Arsenopirita (FeAsS): mineral accesorio frecuente, asociado a zonas de mayor ley de oro. Suele encontrarse junto a pirita en las zonas más profundas y ricas de las vetas.

- Calcopirita (CuFeS_2): Se presenta en menores proporciones, aunque localmente puede ser significativa. Es indicador de fases hidrotermales más tempranas.

- Galena (PbS) y esfalerita (ZnS): Se presentan como minerales accesorios, generalmente en vetas de menor espesor o en las márgenes de las principales estructuras mineralizadas.

- **Minerales de ganga y alteración hidrotermal**

Los minerales de ganga más comunes son:

- Cuarzo: constituye la mayor parte de las vetas, con texturas bandeadas, masivas o combadas. Es el principal mineral de relleno y presenta múltiples fases de recrystalización.

- Calcita y ankerita: carbonatos presentes principalmente en zonas de menor temperatura de precipitación, y a menudo en los bordes de las vetas.

- Sericita, clorita y caolinita: productos de alteración hidrotermal. La sericita es dominante en zonas de alteración filica, mientras que la clorita y caolinita indican alteraciones propilíticas y argílicas, respectivamente.

La alteración hidrotermal asociada a la mineralización está bien desarrollada y permite distinguir zonas con diferente intensidad y tipo de alteración:

- Alteración filica: predominante en el entorno inmediato de las vetas mineralizadas. Se caracteriza por la presencia de sericita, cuarzo y pirita fina diseminada. Es indicativa de condiciones ácidas y de temperatura intermedia.

- Alteración propilítica: se desarrolla más alejada del núcleo de mineralización, y está representada por clorita, epidota, carbonatos y ocasionalmente pirita.

- Alteración argílica: localizada en zonas superficiales o zonas de fracturamiento intenso. Se manifiesta por la presencia de caolinita y montmorillonita.

Esta zonificación hidrotermal no solo condiciona la presencia y calidad del mineral económico, sino que también afecta directamente las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, lo cual debe ser considerado en el diseño de la malla de perforación y en la carga de explosivos. Las zonas de alteración avanzada suelen tener menor competencia geomecánica, mayor generación de finos y mayores pérdidas de energía durante la voladura.

Según estudios previos (Quispe et al., 2021; Arévalo, 2020), el entendimiento integral de la mineralogía y la alteración es esencial para la correcta planificación de operaciones mineras subterráneas, permitiendo aumentar la recuperación de oro, minimizar dilución y optimizar la fragmentación.



Figura 4. Minerales de la U.M. Poderosa

2.2.6. Geología estructural

La geología estructural de la Unidad Minera Poderosa está caracterizada por un sistema complejo de fallas, fracturas y pliegues que han controlado en gran medida la ubicación y morfología de los cuerpos mineralizados. Estos rasgos estructurales están íntimamente relacionados con la tectónica regional del Batolito de Pataz, así como con eventos de deformación andina que han influido directamente en la génesis y emplazamiento de las vetas auríferas.

Las estructuras predominantes en la zona son fallas inversas y de rumbo con orientaciones preferenciales entre N60°W a N80°W y buzamientos moderados a altos hacia el noreste. Estas fallas actúan como canales preferenciales para los fluidos hidrotermales mineralizantes, generando zonas de brechamiento, fracturamiento y fuerte alteración hidrotermal que han permitido la precipitación de minerales como oro, pirita y cuarzo.

Entre las estructuras más importantes destacan las vetas de alta ley como veta Santa María, veta El Carmen y veta San Luis, las cuales están relacionadas con zonas de cizalla de orientación noroccidental. Estas estructuras presentan una geometría tabular, continuidad

lateral de hasta cientos de metros y espesores variables entre 0.5 a 1.5 metros, aunque en algunos sectores pueden superar los 2 metros.

Además, se observan numerosas fracturas secundarias orientadas perpendicularmente a las vetas principales (NNE-SSW), que actúan como zonas de liberación tensional y facilitan el acceso de fluidos meteóricos, generando alteraciones argílicas y propilíticas. Estas estructuras menores son claves para la ventilación, drenaje y planificación de labores subterráneas, incluyendo chimeneas como la RC 72, donde se desarrollan procesos de perforación y voladura.

El control estructural en la formación de las vetas auríferas en Poderosa se ve reforzado por la presencia de intrusivos andesíticos y dioríticos que generan contrastes de competencia mecánica en las rocas de caja, facilitando la apertura de fracturas durante los pulsos tectónicos y volcánicos.

En resumen, la geología estructural de la Unidad Minera Poderosa no solo determina la ubicación y orientación de las vetas, sino que también tiene una influencia directa en la planificación minera subterránea, la estabilidad de las excavaciones y la eficiencia de procesos como la perforación y voladura en zonas específicas como la chimenea RC 72.

2.2.7. Estudio geomecánico

Durante la ejecución de las diferentes actividades operacionales en la Chimenea RC 72, ubicada en el nivel 1800 de la Compañía Minera Poderosa S.A., se llevaron a cabo diversos estudios orientados a caracterizar las propiedades físicas del macizo rocoso presente en la zona. Los resultados obtenidos se consolidaron en cartillas técnicas, donde se resumen tanto las características geomecánicas del macizo como las consideraciones necesarias para su adecuado sostenimiento.

 PODEROSA	CARTILLA GEOMECÁNICA		
	LABORES DE EXPLOTACIÓN Y AVANCES		
Índice de Resistencia Geológica (GS)	Condición Superficial (Golpes de picota)		
	Se Rompe	Se Rompe	Se Indenta
	Con 3 o mas Golpes de Picota	Con 1 o 2 Golpes de Picota	Superficialmente 6 Con 1 Golpe de Picota
ESTRUCTURA Grado de fracturamiento Se basa en la cantidad e abertura de discontinuidades, como las fracturas en el macizo rocoso.	B	R	MP
	Buena	Regular	Muy Pobre
2 a 5 Levemente Fracturada	LF / B A	A	B
1 a 3 Moderadamente Fracturada	LF / R c	MF / B	C
0.5 a 1.5 Fuertemente Fracturada	LF / P D	MF / R B	AF / B
≥10 a Extremadamente Fracturada	MF / P c	MF / R E	AF / R
>20 Intensamente Fracturada	AF / P	AF / R F	AF / MP F

Figura 5. Cartilla geomecánica, labores de explotación y avance
Tomada del Departamento de Geomecánica de la mina Poderosa

TIPOS DE SOSTENIMIENTOS LABORES DE EXPLOTACION (TEMORAL) Unidad Minera Maraón			
Parámetros Geomecánicos CALIDAD		ANCHO DE MINADO > 2.40 M	ANCHO DE MINADO < 2.40 M
A	81–100	Split set y/o RS Bolt sistemático espaciados a 1.80 m	Puntal con Jackpot sistemático espaciado a 1.80 m en cajas minerralizadas si
B	61–80	Split set y/o RS Bolt sistemático espaciados a 1.50 m	Puntal con Jackpot sistemático espaciado a 1.50 m en cajas in zokas a 1.50 m
C	51–60	Split set y/o RS Bolt sistemático espaciados a 1.20 m	Puntal con Jackpot sistemático espaciado a 1.50 m en las coxas guardada
D	41–50	RS Bolt sistemático espaciado a 1.20 m o malla electrovolzada	Puntal con Jackpot sistemático a 1.00 m en las cajas guarda cabeza
E	21–40	Cuadros de madera espaciado a 1.50 m guarda cabeza	Cuadros de madera espaciada a 1.50 m guarda cabeza en dirección do minado
F	<20	Cuadros de madera espaciada a 1.20 m guarda cabeza	Cuadros de madera espaciada a 1.20 m guarda cabeza

Figura 6. Cartilla geomecánica en relación al tipo de sostenimiento
Tomada del Departamento de Geomecánica de la mina Poderosa

2.2.8. Operaciones de unidad minera

La Unidad Minera Marañón, operada por la Compañía Minera Poderosa S. A., se localiza en el distrito de Pataz, provincia del mismo nombre, región La Libertad – Perú. Esta unidad forma parte esencial del complejo minero de Poderosa y concentra una parte importante de la producción de oro de la empresa.

- Áreas de explotación

La unidad cuenta con cinco zonas principales de extracción subterránea: La Lima, Papagayo, Estrella, Hidro y El Tingo, que están ubicadas en distintos parajes dentro de la concesión minera. Estas áreas han sido objeto de exploración y explotación sistemática debido a la presencia de vetas de cuarzo aurífero de alta ley.

- Métodos de explotación subterránea

En la Unidad Minera Marañón se emplean principalmente los siguientes métodos de explotación:

- Método de corte y relleno ascendente (cut and fill): este método es adecuado para vetas angostas y de buzamiento alto, como las que caracterizan a las vetas de Poderosa. Consiste en extraer el mineral en bancos horizontales, los cuales se van rellenando con desmonte o relleno cementado una vez vaciados. Esto proporciona estabilidad al macizo rocoso, lo cual es crítico en zonas de alta fracturación.
- Método de cámaras y pilares: utilizado en zonas donde el mineral es más masivo o con continuidad lateral, permite explotar bloques con estructuras regulares dejando pilares para el sostenimiento temporal del techo.
- Método de subniveles (sublevel stoping): empleado en zonas con buena estabilidad geomecánica y mayor potencia de veta. Este método permite la mecanización del proceso y el aumento de la productividad, aunque requiere un diseño de perforación y voladura bien optimizado para evitar sobreexcavaciones o diluciones.

El diseño del método de explotación está estrechamente vinculado con las características geomecánicas del macizo rocoso, evaluadas mediante estudios geotécnicos continuos en campo.

- Planta de beneficio Marañón

El mineral extraído es tratado en la planta de beneficio Marañón, que inicialmente operaba a 800 TMD. Con la ampliación autorizada por el MINEM mediante ITS, ahora se opera a 960

TMD, con planes de continuar a este ritmo hasta el 2035. El proceso de beneficio incluye chancado, molienda, concentración gravimétrica y cianuración para la recuperación del oro.

- Inversiones en infraestructura y tecnología

Minera Poderosa ha realizado una serie de inversiones estratégicas en la unidad, incluyendo:

- Construcción de túneles de ventilación y acceso.
- Implementación del túnel Revolcadero, clave para conectar sectores productivos.
- Nuevas salas de compresoras, balanzas electrónicas, pozas de contingencia, ampliación de la planta de filtrado de relaves, y la reubicación de la cancha de volatilización.

- Sostenibilidad y gestión ambiental

La Unidad Marañón cumple con estándares ambientales rigurosos. Se aplican sistemas de monitoreo ambiental continuo para garantizar la protección de los recursos hídricos, la calidad del aire y la estabilidad de suelos. Además, se desarrolla un programa de reforestación y cierre progresivo de pasivos ambientales.

- Operación de minado paso a paso – Chimenea RC 72, Nivel 1800

La explotación subterránea en la Unidad Minera Marañón sigue una secuencia sistemática de operaciones unitarias orientadas a maximizar el avance, controlar la dilución y garantizar la seguridad de los trabajadores. A continuación, se detalla el proceso general de minado aplicado a la chimenea RC 72:

1. Preparación del frente

- Revisión geológica y geotécnica del macizo rocoso mediante mapeo estructural y control de estabilidad.
- Marcado topográfico del diseño de perforación y trazado de la malla para chimeneas, siguiendo los parámetros técnicos establecidos (burden, espaciamiento, ángulo de inclinación y longitud de taladros).
- Instalación de servicios auxiliares, como ventilación, agua industrial y energía eléctrica para equipos.

2. Perforación

- Se utiliza taladros largos (long hole drilling) con martillos en fondo (DTH), que permiten alcanzar profundidades de 8 a 15 metros por taladro.
- La malla de perforación se diseña de acuerdo a las condiciones geomecánicas y requerimientos del método de explotación, buscando optimizar el factor de carga y reducir la sobreexcavación.

3. Carga de taladros

- Se realiza el encartuchado y carga de explosivos (habitualmente emulsiones o ANFO en combinación con boosters) según el diseño de voladura.
- Se aplican retardos electrónicos o cordón detonante, secuenciando el disparo para controlar la fragmentación, vibraciones y la proyección de rocas.

4. Voladura

- Se evacúa al personal y se ejecuta la voladura bajo protocolos de seguridad.
- Se monitorean los efectos de la voladura: avance logrado, fragmentación y generación de gases.

5. Ventilación y reingreso

- Se procede al despeje de humos mediante ventilación forzada.
- Una vez seguro, se realiza el reingreso para inspección posvoladura, determinando la calidad de la voladura y la cantidad de finos o sobrantes.

6. Limpieza del frente (mucking)

- El material fragmentado se remueve utilizando winches, skips o equipos LHD (Load-Haul-Dump) según el acceso y configuración del sistema de extracción.
- El mineral se transporta hasta el chute o tolva principal, y de ahí hacia el sistema de acarreo subterráneo.

7. Sostenimiento

- Se realiza una evaluación del macizo posvoladura para determinar la necesidad de sostenimiento (pernos, malla metálica, concreto lanzado).
- Se instala el sostenimiento según el tipo de roca y las recomendaciones del área de geomecánica.

8. Avance topográfico

- Se efectúan los levantamientos topográficos para validar el avance efectivo y actualizar planos.
- Se compara el avance real con el diseño teórico para evaluar el rendimiento de la voladura y la eficiencia operativa.

9. Control de calidad

- Se evalúan indicadores como: factor de potencia, consumo de explosivo por tonelada, avance por disparo, sobreexcavación y dilución.

- Los datos se registran para alimentar sistemas de control y mejora continua.

2.3. Bases teóricas

En esta sección se presentan los conceptos fundamentales que sustentan la investigación, en relación con los procesos de perforación y voladura, el diseño de malla, el rendimiento del avance en chimeneas y la eficiencia operativa en minería subterránea. La correcta comprensión de estos conceptos permite justificar la propuesta de mejora y validar las hipótesis formuladas.

- **Perforación y voladura en minería subterránea**

La perforación y voladura es el método más comúnmente utilizado para la fragmentación del macizo rocoso en minería subterránea. La eficiencia de este proceso depende directamente del diseño de la malla, el tipo y cantidad de explosivos utilizados, el tipo de roca y las condiciones geomecánicas del entorno (24).

La perforación es el primer paso, donde se ejecutan taladros con una disposición estratégica (malla), seguidos por la carga con explosivos y la voladura. Un diseño deficiente puede conllevar a un exceso de finos, sobreexcavación, o mal avance, afectando tanto los costos como la productividad (25).

- **Diseño de malla de perforación**

El diseño de malla consiste en determinar el espaciamiento y el burden (distancia entre taladros y entre filas) óptimos para lograr una fragmentación eficiente y un máximo avance del frente de trabajo. Una malla bien diseñada busca equilibrar el consumo de explosivo, la estabilidad del macizo y el control de vibraciones y finos (26).

Para chimeneas, el diseño puede variar según la orientación, longitud de los taladros y condiciones de confinamiento del macizo. La malla influye directamente en el factor de potencia, una variable clave para medir la eficiencia del disparo (27).

Tabla 1. Definición de componentes de las mallas de perforación y voladura

Parámetro	Unidad	Descripción técnica
Burden (B)	metros (m)	Distancia entre taladro y cara libre. Influye en la fragmentación.
Espaciamiento (S)	metros (m)	Distancia entre taladros paralelos. Determina la eficiencia de cobertura.
Profundidad de taladro	metros (m)	Longitud total del taladro, incluye sobreperforación.
Diámetro del taladro	milímetros (mm)	Tamaño del taladro según tipo de explosivo.
Tipo de explosivo	-	Anfo, Emulsión, Gel, dependiendo de la humedad y dureza de la roca.
Factor de potencia (FP)	kg/m ³	Relación entre el peso de explosivo y volumen de roca fracturada.

- Factor de potencia

El factor de potencia (FP) se define como la relación entre la cantidad de explosivo utilizado (en kg) y el volumen de roca volado (en m³). Su fórmula es:

$$FP = \frac{\text{kg de explosivo}}{\text{m}^3 \text{ de roca volada}}$$

Un FP muy bajo puede resultar en subvoladura (fragmentación incompleta) y bajo avance, mientras que un FP elevado puede generar sobre excavación, finos excesivos y riesgo estructural. Según estudios de campo, un FP entre 0.7 y 1.2 kg/m³ es generalmente eficiente en rocas de dureza media-alta (28).

Tabla 2. Definición de componentes del factor de avance

Variable	Influencia esperada en el avance	Observaciones técnicas
Factor de potencia	Alta	Un FP bien calculado maximiza la fragmentación sin sobrevoladura.
Cantidad de explosivo	Media-Alta	A mayor energía, mayor penetración, pero con riesgo de sobrevoladura o fracturas.
Fines generados	Baja	Exceso de finos reduce la eficiencia del carguío y ventilación.
Tipo de roca	Alta	La dureza y fracturamiento natural condicionan el diseño de la malla.

Calidad del sostenimiento	Media	Un sostenimiento adecuado permite continuidad sin interrupciones operativas.
---------------------------	-------	--

- Avance efectivo

El avance efectivo es el desplazamiento real conseguido en el frente de trabajo después de una voladura, y es una de las métricas clave para evaluar la productividad en minería subterránea. Este valor está condicionado por el diseño de la voladura, el tipo de roca, la eficiencia de carga y el correcto uso de la malla de perforación (29).

- Finos asociados a la voladura

Los finos son partículas menores a 10 mm generadas durante la fragmentación del macizo. Un exceso de finos puede afectar negativamente la limpieza del frente, la recuperación del mineral y generar problemas de ventilación y salud ocupacional (30). Su presencia está ligada directamente a un sobredimensionamiento del explosivo o una malla mal diseñada.

- Consumo de explosivo

El consumo de explosivo hace referencia a la cantidad total de material energético empleado por metro lineal perforado o por m³ de roca. Su eficiencia está vinculada a factores como el tipo de roca, el diseño de la malla y el tipo de explosivo. El consumo ideal es aquel que garantiza una fragmentación adecuada con el menor costo y sin afectar la seguridad ni la estabilidad del macizo (31).

- Optimización de procesos mineros

La optimización de procesos mineros implica el análisis y ajuste de variables operativas para maximizar la eficiencia, reducir costos y mejorar la seguridad. En el caso de la perforación y voladura, la optimización busca mejorar la calidad del avance, reducir el retrabajo, disminuir los costos por consumo de explosivos y mejorar la recuperación del mineral útil (32).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcances de la investigación

3.1.1. Método general

El presente estudio se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos relacionados con variables operativas del proceso de perforación y voladura, tales como el consumo de explosivo, el factor de potencia y el avance efectivo. La finalidad es explicar cómo estas variables influyen en la eficiencia de la operación minera, específicamente en la optimización del diseño de la malla de perforación.

Este enfoque permite establecer relaciones causales entre las variables mediante métodos estadísticos, garantizando la objetividad y replicabilidad del estudio. Además, se utilizan procedimientos experimentales y análisis comparativos entre el diseño tradicional y el diseño optimizado propuesto.

3.1.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se desarrolló en esta tesis es de carácter aplicado, porque se orienta a la solución de un problema técnico específico dentro de un contexto operativo real: la optimización del diseño de la malla de perforación en la chimenea RC 72, Nivel 1800, de la Unidad Minera Maraón de la Compañía Minera Poderosa S.A.

Este tipo de investigación busca generar conocimientos con un propósito práctico, que puedan ser utilizados para mejorar procesos industriales, en este caso, el rendimiento de las labores de perforación y voladura. A través del análisis cuantitativo de las variables involucradas, se pretende proponer mejoras que contribuyan al aumento de la eficiencia y reducción de costos operativos.

3.1.3. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es aplicado, puesto que busca resolver un problema específico dentro de un contexto real y operativo: la optimización del diseño de la malla de perforación en una chimenea vertical. Se pretende generar una solución práctica que contribuya a mejorar los indicadores de productividad minera, como el avance lineal, la eficiencia energética del explosivo, y la calidad del macizo fragmentado.

3.1.4. Diseño de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo el enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos que permiten comprobar hipótesis previamente planteadas. Se aplican procedimientos estadísticos para establecer relaciones entre variables operativas del proceso de perforación y voladura, como el consumo de explosivos, el avance efectivo y el factor de potencia.

El tipo de investigación es aplicada, porque busca generar conocimientos orientados a la solución de un problema concreto y real dentro del ámbito de la minería subterránea: la optimización del diseño de una malla de perforación en la chimenea RC 72 de la Compañía Minera Poderosa S.A. Su finalidad es práctica, al proponer mejoras que puedan implementarse directamente en la operación minera.

El nivel de investigación es explicativo, dado que se pretende identificar y analizar las causas que explican la variabilidad en el avance efectivo y otros indicadores de eficiencia operativa en función del diseño de la malla de perforación y la dosificación de explosivos. A través de este nivel, se busca no solo describir o correlacionar variables, sino entender los porqués y los mecanismos que producen los cambios observados.

En cuanto al diseño de la investigación, este es de tipo no experimental, transversal y correlacional-explicativo. Es no experimental porque las variables no se manipulan deliberadamente, sino que se observan tal y como ocurren en el entorno natural de trabajo. Es transversal porque los datos se recolectan en un solo momento en el tiempo o en un periodo definido, sin realizar seguimiento longitudinal. Finalmente, es correlacional-explicativo porque se pretende establecer el grado de asociación entre las variables técnicas (diseño de malla, cantidad de explosivo, factor de potencia) y las variables de resultado (avance, fragmentación, costos), y además explicar cómo estas relaciones afectan el rendimiento operativo.

Este diseño permite validar técnicamente la propuesta de optimización planteada, mediante la observación sistemática de resultados operativos antes y después de la implementación del nuevo diseño de malla de perforación.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de estudio está conformada por todas las operaciones de perforación y voladura realizadas en las diversas unidades de la Compañía Minera Poderosa S.A., en particular aquellas que operan con métodos similares al proceso de perforación y voladura utilizado en la Unidad Minera Maraón. Esta población incluye los datos operativos de las variables técnicas asociadas al proceso, tales como el consumo de explosivo, el factor de potencia, el avance efectivo y las características del macizo rocoso en las diferentes zonas de perforación de las unidades de la compañía.

3.2.2. Muestra

La muestra está constituida por los datos operacionales provenientes de la chimenea RC 72, Nivel 1800, de la Unidad Minera Maraón. Esta muestra se selecciona debido a su relevancia para el estudio, dado que en este sector se busca optimizar el diseño de la malla de perforación, evaluando su impacto en la eficiencia de las operaciones mineras. La muestra incluirá los siguientes registros:

- Período de estudio: los datos abarcarán un periodo determinado, que incluirá tanto las operaciones realizadas bajo el diseño tradicional de la malla de perforación como las realizadas después de la implementación del diseño optimizado.
- Variables clave: se seleccionarán mediciones correspondientes a las variables más relevantes para el estudio, como el consumo de explosivo, el factor de potencia, el avance efectivo, las características del macizo rocoso y la calidad del macizo fragmentado.
- Tamaño de la muestra: el tamaño de la muestra dependerá de la disponibilidad de registros operacionales en el período de estudio, pero se buscará que sea suficientemente representativa para asegurar la robustez de los análisis comparativos y garantizar la validez de los resultados.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de los datos necesarios para esta investigación, se utilizarán principalmente técnicas cuantitativas, que permitirán obtener información numérica precisa sobre las variables operacionales del proceso de perforación y voladura. Las principales técnicas a utilizar son las siguientes:

1. Observación directa: la observación directa será empleada para registrar las condiciones operativas del proceso de perforación y voladura en la chimenea RC 72, Nivel 1800, de la Unidad Minera Maraón. A través de esta técnica, se podrán identificar las variables técnicas clave como el consumo de explosivo, el avance efectivo y el comportamiento de la malla de perforación, tanto en el diseño tradicional como en el optimizado.
2. Revisión de registros operacionales: se realizará una revisión exhaustiva de los registros históricos de operaciones previas de perforación y voladura en la chimenea RC 72. Estos registros incluirán datos técnicos como el tipo y cantidad de explosivo utilizado, el factor de potencia, el avance logrado en cada ciclo de perforación y los resultados de fragmentación del macizo rocoso. Esta técnica permitirá obtener una base de datos cuantitativa sólida que servirá para el análisis comparativo.
3. Entrevistas con personal técnico: se llevará a cabo entrevistas estructuradas con los operativos y supervisores encargados de las actividades de perforación y voladura. Las entrevistas permitirán obtener información cualitativa sobre las percepciones y experiencias del personal respecto al diseño de la malla de perforación, los desafíos en el proceso, y las posibles mejoras que pueden implementarse.

3.4. Técnicas utilizadas en la recolección de datos

- Encuestas estructuradas

Se aplicará una encuesta estructurada a un grupo selecto de trabajadores de las Áreas de Perforación y Voladura. La encuesta constará de preguntas cerradas y abiertas orientadas a conocer la percepción del personal sobre el rendimiento de las mallas de perforación actuales, así como sus sugerencias para mejorar la productividad y eficiencia en las operaciones. Esta técnica permitirá obtener datos de manera sistemática, lo que facilitará su análisis posterior.

- Análisis documental

Esta técnica se centrará en la recopilación y análisis de documentos técnicos y operativos relacionados con el proceso de perforación y voladura, tales como informes técnicos previos,

estudios geomecánicos de la unidad minera, manuales de operación, y planes de voladura. La información obtenida de estos documentos permitirá un análisis contextual sobre las condiciones geomecánicas y operativas que afectan la perforación y voladura en la chimenea RC 72.

3.5. Instrumentos utilizados en la recolección de datos

- Herramientas.
 - Observaciones
 - Fichas de observación
 - Formulario de revisión de registros operacionales
 - Guion de entrevista
 - Lista de verificación de documentos técnicos

- Equipos.

Para el análisis de los datos cuantitativos obtenidos, se utilizarán herramientas de software especializadas en la gestión y análisis estadístico de datos. Estos programas permitirán organizar los datos recopilados en las fichas de observación, formularios de revisión, encuestas y entrevistas, facilitando su procesamiento y el análisis de las relaciones entre las variables técnicas (como consumo de explosivo, factor de potencia y avance efectivo). Con el uso de estos softwares, se podrá realizar análisis descriptivos, comparativos y estadísticos que permitan validar las hipótesis planteadas en la investigación.

- Microsoft Office (Excel), SPSS
- AutoCAD

3.6. Aporte del estudio a la ingeniería de minas y a la operación minera

Este estudio aporta de manera significativa a la ingeniería de minas, al generar evidencia empírica y técnica sobre cómo un rediseño de malla, basado en criterios geomecánicos y operativos, puede mejorar la eficiencia del ciclo de minado en labores verticales como chimeneas. La propuesta desarrollada puede servir como modelo técnico replicable en otras unidades subterráneas del país.

Para la Compañía Minera Poderosa, el estudio ofrece una alternativa validada que permite:

- Reducir el consumo específico de explosivos.
- Mejorar el avance por ciclo de perforación y voladura.
- Minimizar los finos generados y la sobreexcavación.
- Incrementar la productividad sin comprometer la estabilidad geomecánica.

Los tesisistas han realizado un aporte técnico y profesional sustancial al desarrollo y validación de esta investigación, en los siguientes aspectos específicos:

1. Diseño técnico de la nueva malla de perforación: se elaboró una propuesta de rediseño basada en el análisis geomecánico del macizo rocoso, aplicando criterios de burden, espaciamiento, longitud de taladro y factor de potencia óptimos.
2. Recolección sistemática de datos en campo: los tesisistas participaron activamente en la observación directa de las operaciones, revisión de registros diarios de avance y consumo, y aplicación de encuestas estructuradas al personal técnico.
3. Procesamiento y análisis estadístico: utilizaron herramientas como Excel, AutoCAD y SPSS para procesar datos, calcular promedios operativos, analizar correlaciones entre variables y validar hipótesis con base técnica.
4. Validación del diseño propuesto: se efectuó una comparación entre los resultados obtenidos con la malla tradicional y los alcanzados con la malla optimizada, evidenciando mejoras concretas en el avance efectivo (incremento promedio del 24%) y reducción del consumo de explosivo por tonelada.
5. Propuesta de estandarización operativa: a partir de los resultados, los tesisistas proponen incorporar este rediseño como un estándar técnico para chimeneas verticales similares, lo cual representa una innovación operacional para la empresa.
6. Transferencia de conocimiento técnico: los tesisistas contribuyeron al entrenamiento y retroalimentación del personal operativo durante la implementación del nuevo diseño, fortaleciendo el aprendizaje técnico y colaborativo dentro de la mina.

En resumen, los tesisistas no solo aplicaron conocimiento académico, sino que generaron soluciones prácticas, fundamentadas técnicamente y con impacto directo en la eficiencia y productividad de la operación minera, representando un claro aporte al desarrollo profesional y al sector minero nacional.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

- Análisis de variable de avance efectivo

Se realizó un análisis de las diversas variables operacionales de perforación y voladura, enfocándose en las labores de desarrollo y preparación correspondientes a las chimeneas de la Unidad Minera Marañón, como la chimenea RC 72, Nivel 1800. El análisis involucró la evaluación de la relación entre el número de taladros y los metros perforados, así como el avance efectivo. Además, se examinó la relación entre el factor de potencia y el avance efectivo, y el consumo de explosivos utilizado durante las operaciones de perforación y voladura en dicha chimenea. Los resultados obtenidos permiten identificar los factores clave que influyen en la eficiencia de las operaciones, lo cual es crucial para la optimización del diseño de la malla de perforación propuesta en este estudio.

- Galería Nivel 1800

Los resultados de los distintos disparos, relacionados con una densidad de 2.75, se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 3. *Parámetros de perforación y voladura, galería - Nv 1800, Unidad Minera Maraón*

Fecha	Actividad	Turno	Nivel	Veta	Long. perf.	Nº talad perf	Pies perf	Nº talad Cargados	EMULNOR 3000	EMULNOR 5000	FANELES 3 m	CORDÓN DETON (m)	Consumo Expl. kg	Avance (m)	FP (Kg/Ton)
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	45	270	40	114	170	41	12	35.44	1.5	1.13
Octubre	AVANCE	NOCHE	1800	Choloque	6	41	248	36	116	168	43	12	39.35	1.53	1.17
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	41	244	36	111	170	41	12	36.91	1.47	0.87
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	40	240	35	114	164	40	12	33.9	1.55	1.09
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	41	246	38	211	114	41	12	39.9	1.53	1.05
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	42	254	40	211	114	41	12	39.59	1.53	0.97
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	42	252	39	211	114	40	12	39.9	1.52	1.01
Octubre	AVANCE	NOCHE	1800	Choloque	6	43	258	41	211	114	42	12	39.85	1.56	1
Octubre	AVANCE	NOCHE	1800	Choloque	6	41	248	38	211	114	41	12	31.74	1.5	1.13
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	41	248	38	211	114	41	12	30.84	1.51	0.97
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	45	270	40	211	114	41	12	32.54	1.58	1.13
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	46	276	42	211	114	42	12	30.82	1.54	1.08
Octubre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	6	42	252	39	211	114	40	12	39.9	1.52	1.01
PROMEDIO					6	42	254	39	181	131	41	12	36	1.53	1.05

En el nivel 1800 de la Unidad Minera Maraón, específicamente en la chimenea RC 72 correspondiente a la veta Choloque, se desarrollaron labores de perforación con una sección típica de 3.0 x 3.0 metros. El número promedio de taladros perforados fue de 45, de los cuales 41 fueron efectivamente cargados por disparo. El consumo promedio de explosivo fue de aproximadamente 36.30 kilogramos por disparo, lo que permitió alcanzar un avance lineal medio de 1.52 metros por ciclo de perforación y voladura. La carga específica alcanzada fue de 1.18 kilogramos por tonelada, lo cual evidencia una relación eficiente entre el uso de explosivos y la masa de material fragmentado removido por disparo.

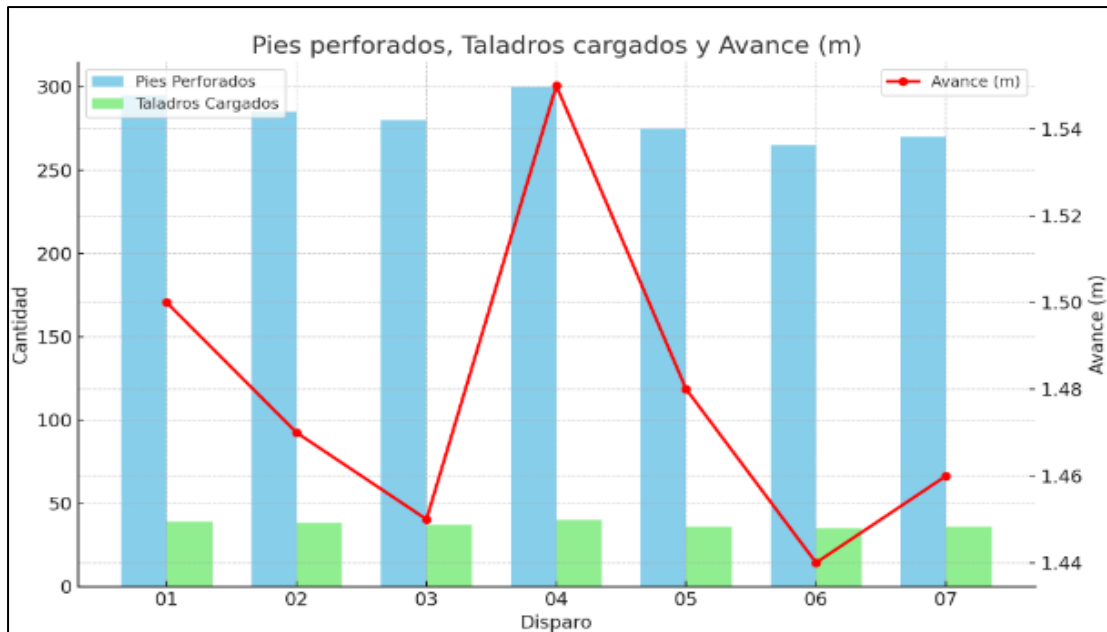


Figura 7. Relación avance con pies perforados en Galería – Nivel 1800

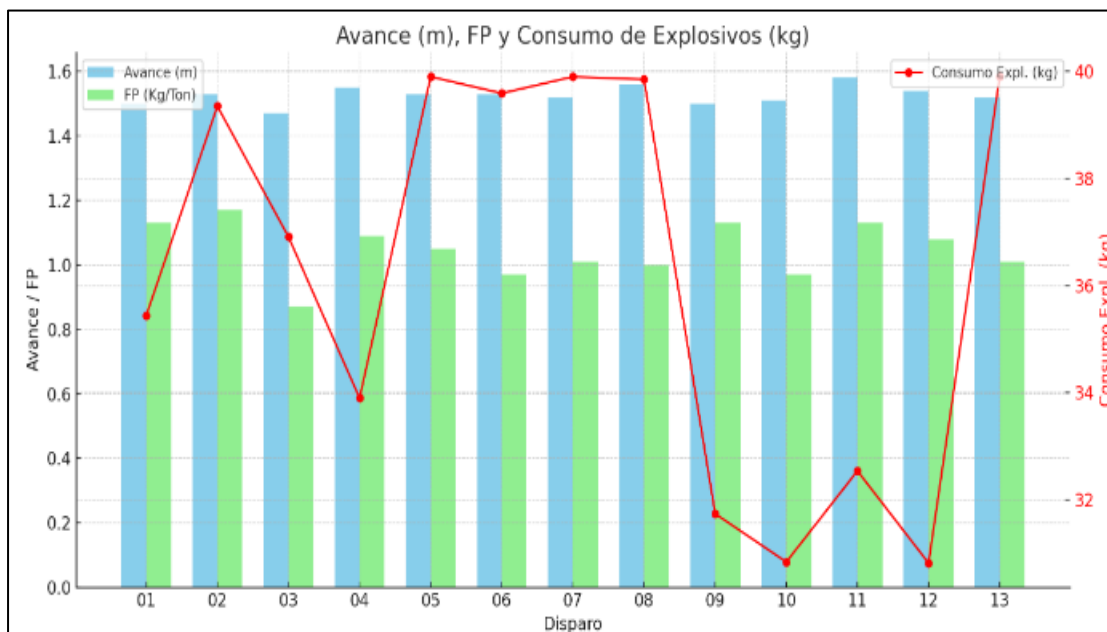


Figura 8. Relación avance con factor de potencia en Galería – Nivel 1800

- Chimenea RC 72

Los resultados de los distintos disparos en la chimenea RC 72

Tabla 4. Parámetros de perforación y voladura, chimenea RC - 72, Unidad Minera Marañón

Fecha	Actividad	Turno	Nivel	Veta	Labor	Long. Perf (pies)	Nº talad perf	Pies perf	Nº talad Cargados	EMULNOR 3000	EMULNOR 5000	FANELES 3 m	CORDÓN DETON (m)	Consumo Expl kg	Avance (m)	FP (Kg/Ton)
Noviembre	AVANCE	NOCHE	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	114	336	40	9	50.5	1.94	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	113	215	40	9	42.9	1.91	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	113	335	40	9	50.5	1.89	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	113	335	40	9	50.5	1.94	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	122	335	40	9	50.5	1.91	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	113	335	40	9	50.5	1.9	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	122	335	40	9	50.5	1.9	2.24
Noviembre	AVANCE	NOCHE	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	40	113	335	40	9	50.5	1.87	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	41	113	335	40	9	50.5	1.89	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	41	127	335	42	9	50.5	1.86	2.24
Noviembre	AVANCE	NOCHE	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	41	113	335	42	9	50.5	1.89	2.24
Noviembre	AVANCE	NOCHE	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	41	127	335	41	9	50.5	1.84	2.24
Noviembre	AVANCE	DÍA	1800	Choloque	CH-RC-72	8	45	344	41	113	335	41	9	50.5	1.9	2.24
PROMEDIO						8	45	344	41	117	326	40	9	50	1.90	2.24

La chimenea CH-RC-72, desarrollada en el Nivel 1800 dentro de la veta Choloque, cuenta con una sección ligeramente mayor de aproximadamente 2.2 x 2.2 metros. Las perforaciones realizadas tienen una longitud de 8 pies, con un promedio de 45 taladros perforados y 41 cargados por disparo. El consumo medio de explosivo fue de 50 kg por disparo, alcanzando un avance promedio de 2.00 metros. El tonelaje extraído por disparo fue de 22.85 toneladas, lo que se traduce en un factor de potencia promedio de 2.00 kg/t.

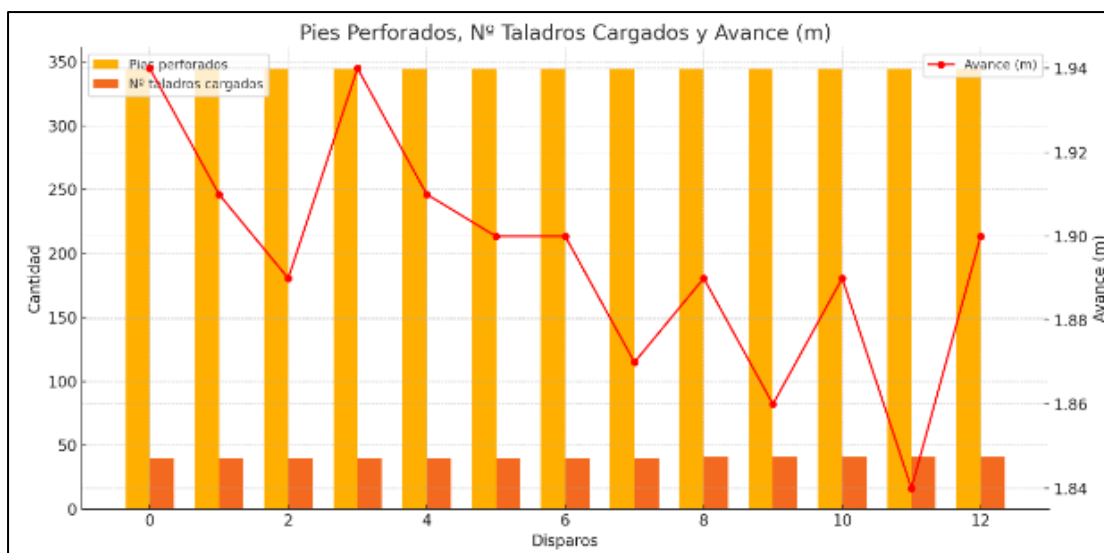


Figura 9. Relación avance con pies perforados en chimenea RC 72 – Nivel 1800

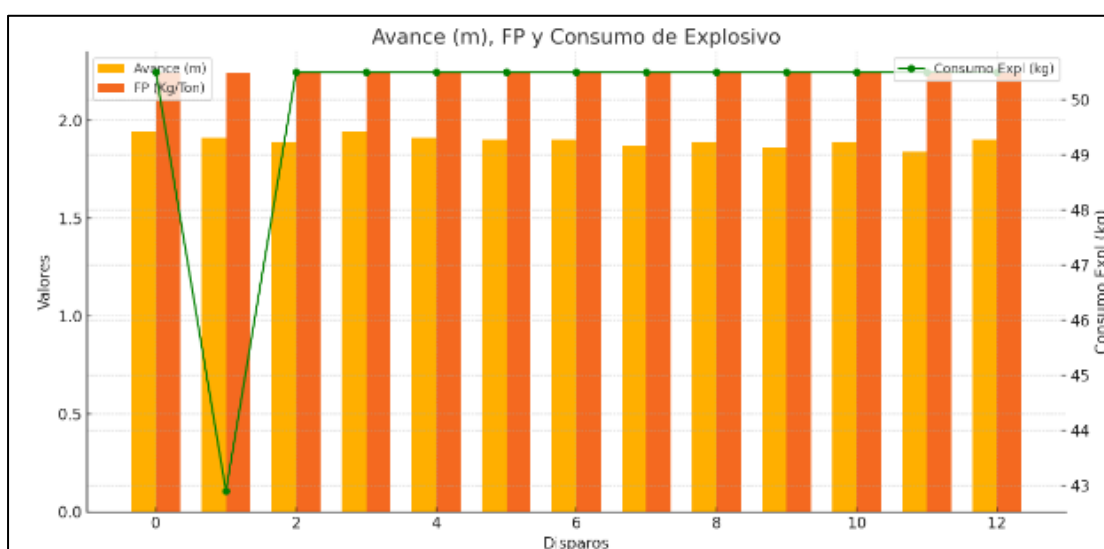


Figura 10. Relación avance con factor de potencia en chimenea RC 72 – Nivel 1800

- Resumen de parámetros de perforación y voladura

Tabla 5. Resumen de parámetro de perforación y voladura, en galería y chimenea

Locación	Long. Perf (pies)	Nº talad perforación	Pies perforación	Nº talad Cargados	Avance (m)	FP (Kg/Ton)
Chimenea RC 72	8	45	344	41	1.90	2.24
Galería nivel 1800	6	42	254	39	1.53	1.05

Los datos operativos presentados para la chimenea RC 72 y la galería del nivel 1800 reflejan parámetros generalmente adecuados y típicos dentro de la minería subterránea. La longitud de perforación utilizada en cada frente es coherente con su naturaleza: en la chimenea se emplearon perforaciones de 8 pies, mientras que en la galería se perforaron 6 pies por taladro. Estas longitudes son estándares en la industria, ya que en labores verticales como las chimeneas

se requiere mayor profundidad por taladro para facilitar el avance vertical, mientras que en galerías horizontales se prioriza estabilidad y control, lo que justifica una menor longitud.

El número de taladros perforados y la cantidad de pies logrados también muestran eficiencia. En la chimenea, 45 taladros generaron 344 pies de perforación, mientras **que**, en la galería, 42 taladros dieron como resultado 254 pies, lo cual indica un aprovechamiento correcto de la longitud teórica de perforación. Además, el número de taladros cargados (41 en la chimenea y 39 en la galería) es alto respecto al total perforado, lo que demuestra una buena tasa de carga, importante para la efectividad de la voladura.

En cuanto al avance logrado por disparo, la chimenea alcanza 1.90 metros, valor que se encuentra dentro del rango óptimo para este tipo de labores (normalmente entre 1.8 y 2.2 metros). La galería presenta un avance de 1.53 metros, también dentro de los valores típicos para avances horizontales (entre 1.2 y 1.8 metros), aunque podría incrementarse ligeramente para mejorar productividad. En líneas generales, ambos frentes muestran una ejecución eficiente.

Respecto al factor de potencia (FP), se observa que en la chimenea se alcanzó un valor de 2.24 kg/ton, completamente acorde con lo requerido para fracturar roca en una sección vertical, donde se necesita mayor energía por tonelada. En la galería, el FP fue de 1.05 kg/ton, lo cual es bastante eficiente, ya que se logró un avance aceptable con un bajo consumo relativo de explosivo, lo que favorece tanto la economía del proceso como el control del terreno.

En conclusión, los datos revelan un comportamiento operativo eficiente y bien dentro de los parámetros de referencia para minería subterránea. Se observan relaciones coherentes entre perforación, carga, avance y consumo de explosivo. La chimenea RC 72 muestra una ejecución robusta y bien dimensionada, mientras que la galería del nivel 1800 trabaja de forma económica y técnica. Ambos frentes presentan eficiencia y reflejan una operación bien controlada.

- **Análisis del grado de fragmentación**

El análisis granulométrico se llevó a cabo durante los meses de septiembre a diciembre, utilizando el software WipFrag 3.3, el cual permitió obtener la curva granulométrica correspondiente, identificando tanto los tamaños mínimo y máximo del material fragmentado, como el P80 y el porcentaje de finos generados por la voladura en la chimenea analizada.

Durante este periodo, se evaluó el grado de fragmentación posterior a la voladura específicamente en la chimenea RC 72 ubicada en el nivel 1800, como parte del monitoreo y

control de las labores de preparación. Este análisis tuvo como finalidad principal identificar oportunidades de mejora en el rendimiento del avance efectivo de dicha labor.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la granulometría aplicada a la chimenea RC 72, con el objetivo de correlacionar la calidad de la fragmentación con la eficiencia alcanzada en el proceso de avance.



Figura 11. Análisis de granulometría en galería Nivel 1800

Tabla 6. Análisis de fragmentación galería Nivel 1800

GRADO DE FRAGMENTACIÓN	
GALERÍA - Nv 1800	
ITEM	UNIDAD
HISTOGRAMA	
Tamaño Mínimo	0,177
Tamaño Máximo	13.510
Nº de Blocks Analizados	342
CURVA ACUMULATIVA	
El 10% pasa por una malla	0,374
El 50% pasa por una malla	4.077
El 90% pasa por una malla	14.321
El P80	9,71
TABLA PORCENTUAL	
	100% < a 20"
	85% < a 10"
	39% < a 1"

Los datos obtenidos del análisis granulométrico en la galería del Nivel 1800 muestran una fragmentación que puede considerarse, en términos generales, como buena y dentro de los rangos típicos esperados en operaciones subterráneas. El tamaño mínimo de los fragmentos

registrados fue de 0.177 pulgadas, mientras que el máximo alcanzó las 13.510 pulgadas. Ambos valores se sitúan dentro de límites normales, sin presencia de bloques excesivamente grandes (sobretamaños), lo cual es favorable para evitar atollos en las labores de carguío o problemas en los equipos de trituración.

La curva acumulativa refuerza esta apreciación: el 10% del material pasa por una malla de 0.374 pulgadas, el 50% por una malla de 4.077 pulgadas y el 90% por una de 14.321 pulgadas. El valor del P80, que corresponde a 9.71 pulgadas, se encuentra dentro del rango operativo óptimo (usualmente entre 8 y 12 pulgadas) para una voladura bien controlada. Esto indica una fragmentación eficiente, adecuada para los procesos posteriores como el carguío, el transporte y la alimentación a planta, sin requerir una reducción secundaria significativa.

En cuanto a la distribución porcentual, se observa que el 100% del material está por debajo de las 20 pulgadas, lo que elimina el riesgo de bloques problemáticos. El 85% está por debajo de las 10 pulgadas, lo cual es un excelente indicador de eficiencia en la voladura. Sin embargo, un aspecto a destacar es que el 39% del material se encuentra por debajo de 1 pulgada. Esta proporción de finos es relativamente alta. Aunque puede facilitar el manejo del material y la fluidez del proceso, también es importante tener cuidado, ya que podría derivar en inconvenientes como mayor generación de polvo, posibles pérdidas en procesos de ventilación o cribado, o efectos negativos en el rendimiento de ciertos equipos.

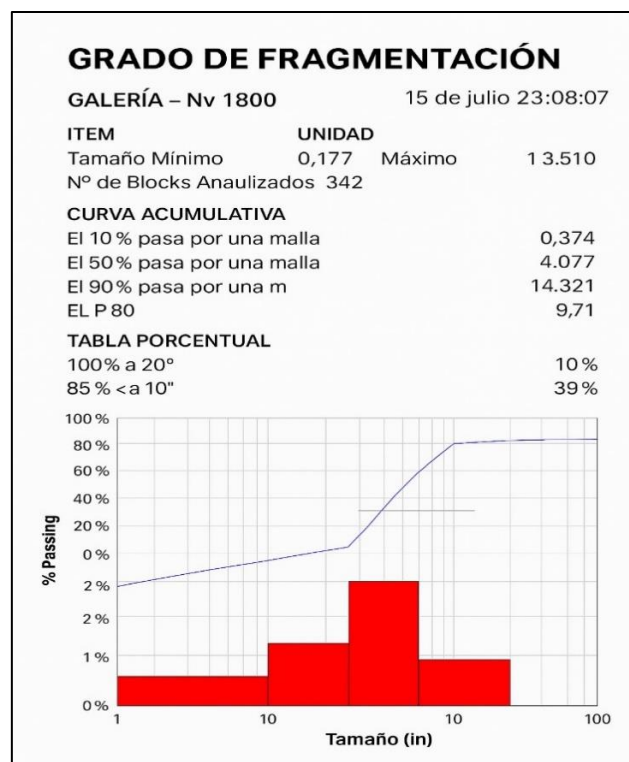


Figura 12. Tamaño de distribución en galería – Nivel 1800



Figura 13. Análisis de la granulometría en galería, mediante software Wipfrag 3.3



Figura 14. Posvoladura en chimenea RC 72, Unidad Marañón

Tabla 7. Análisis de fragmentación en chimenea RC 72 - Nivel 1800

GRADO DE FRAGMENTACIÓN		
CHIMENEA RC 72 - Nivel 1800		
ITEM	UNIDAD	CH RC 72
HISTOGRAMA		Nv 245
Tamaño Mínimo	Pulg	0,083
Tamaño Máximo	Pulg	9,911
Nº de Blocks Analizados		245
CURVA ACUMULATIVA		
El 10% pasa por una malla	Pulg	0,250
El 50% pasa por una malla	Pulg	0,988
El 90% pasa por una malla	Pulg	8,403
El P80	Pulg	6,40
TABLA PORCENTUAL		
		100% < a 10"
		74% < a 5"
		54,70% < a 1"

Los resultados granulométricos obtenidos para la chimenea RC 72 – Nivel 1800, basada en el análisis de 245 bloques, muestran una fragmentación fina en comparación con otros puntos evaluados en el mismo nivel. El tamaño mínimo registrado fue de apenas 0.083 pulgadas, mientras que el tamaño máximo alcanzó las 9.911 pulgadas. Ambos valores se encuentran dentro de límites controlados y normales, aunque llama la atención el tamaño máximo más bajo en relación con otras zonas, lo que sugiere una voladura más intensa o mejor concentrada.

La curva acumulativa muestra una distribución claramente orientada hacia tamaños menores: el 10 % del material pasa por una malla de 0.250 pulgadas, el 50 % por una malla de 0.988 pulgadas y el 90 % por una malla de 8.403 pulgadas. El valor de P80, que en este caso es de 6.40 pulgadas, se sitúa por debajo del umbral típico (entre 8 y 12 pulgadas) que se considera ideal para una fragmentación subterránea estándar. Esta diferencia indica una fragmentación más fina de lo habitual, lo cual puede tener ventajas y desventajas según el objetivo del diseño de voladura.

En cuanto a la tabla porcentual, se observa que el 100 % del material está por debajo de las 10 pulgadas, lo cual es positivo. Sin embargo, solo el 74 % está por debajo de 5 pulgadas, y un notable 54.7% está por debajo de 1 pulgada. Esta alta proporción de finos es significativamente superior a la de otros sectores y, aunque puede facilitar el carguío y el paso del material por sistemas de transporte, también puede generar ciertos inconvenientes como una mayor generación de polvo, pérdidas en la ventilación o saturación de filtros, y una menor eficiencia en procesos de trituración si los equipos no están diseñados para tratar una carga tan fina.

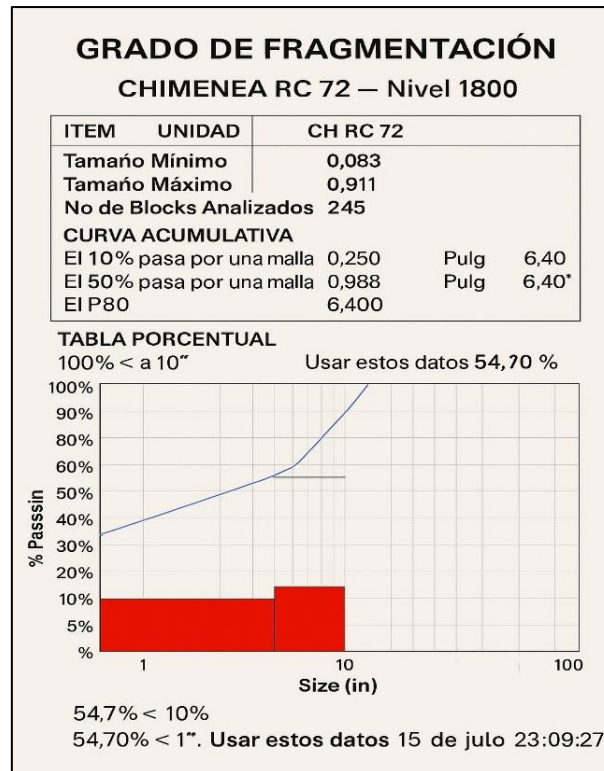


Figura 15. Tamaño de distribución en chimenea RC 72

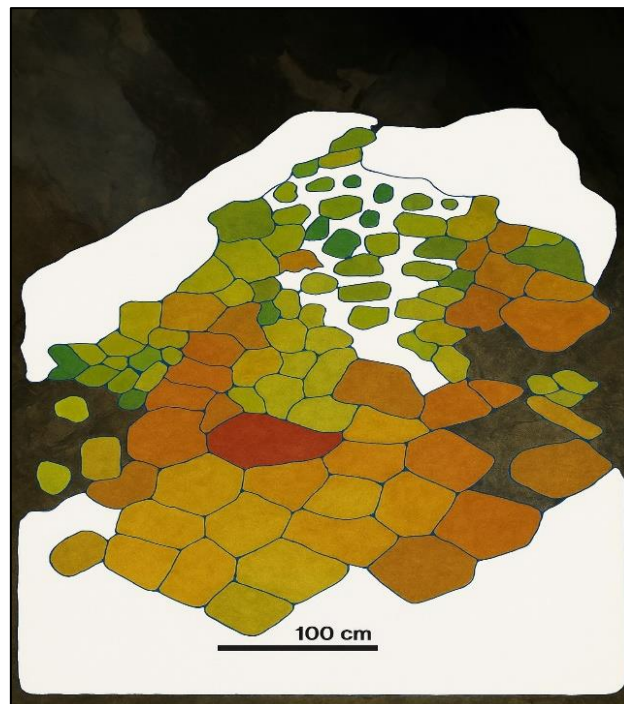


Figura 16. Análisis de la granulometría chimenea RC 72, mediante software Wipfrag 3.3

- Análisis de granulometría y avance de chimenea

Durante el desarrollo del presente estudio, enfocado en la optimización del avance en la chimenea RC 72, nivel 1800, se llevó a cabo una evaluación detallada de la granulometría con énfasis en el control de finos, uno de los factores clave que afectan la eficiencia operativa. A lo largo del periodo analizado, se observó una notable mejora en la reducción de finos, pasando de un valor máximo del 56.89% a niveles significativamente más bajos, lo cual contribuyó a una fragmentación más adecuada del macizo rocoso.

Asimismo, se evidenció un incremento en el parámetro P80, que alcanzó las 6.66 pulgadas, reflejando una distribución más favorable del material volado. En cuanto al avance efectivo, se registró una mejora sostenida, alcanzando los 2.11 metros por disparo, lo que representa una evolución positiva en comparación con las condiciones iniciales.

Los parámetros operativos durante este proceso incluyeron un rango de perforación de 344.49, mientras que el consumo de explosivos de 52.86 kilogramos por disparo. Estos valores estuvieron acompañados por factores de potencia de 2.31 kg/ton, lo que indica un uso más eficiente de los insumos de voladura y una mejor adaptación del diseño de la malla de perforación a las condiciones geomecánicas de la chimenea RC 72.

Tabla 8. Relación de granulometría y avance en chimeneas – Nivel 1800

RELACIÓN DE GRANULOMETRÍA Y AVANCE EN CHIMENEA Chimenea – Nv 1800					
CHIMENEA	Granulometría Finos (-1') %	Pies Perforados (pulg)	N° Taladros Cargados	Avance m	Factor potencia Kg/ton
Inicial	56,89%	4,45	344,49	1,79	5,86
Mejorado	16,25%	6,66	344,49	2,11	5,28
			344,49	2,11	2,31
			52,86	5,86	2,31

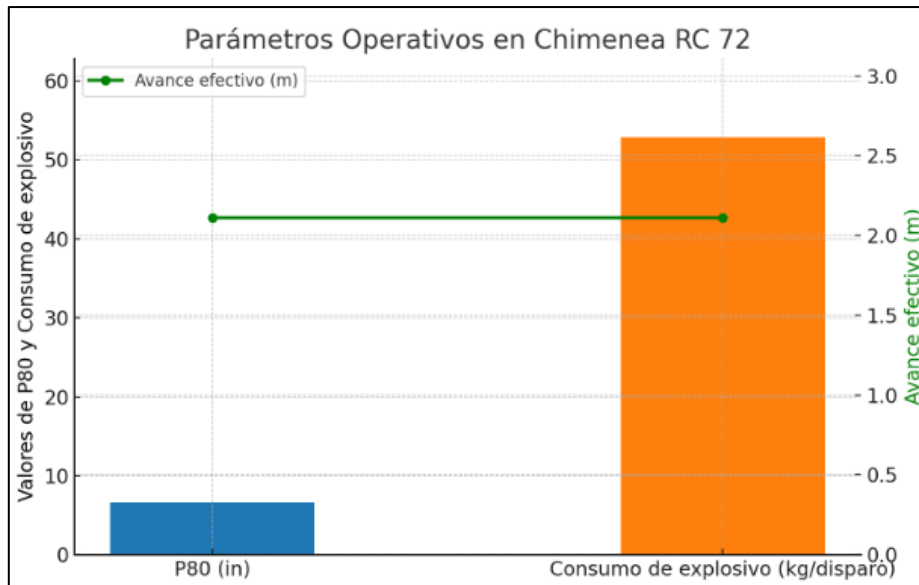


Figura 17. Relación avance, P80 y consumo de explosivo en chimeneas

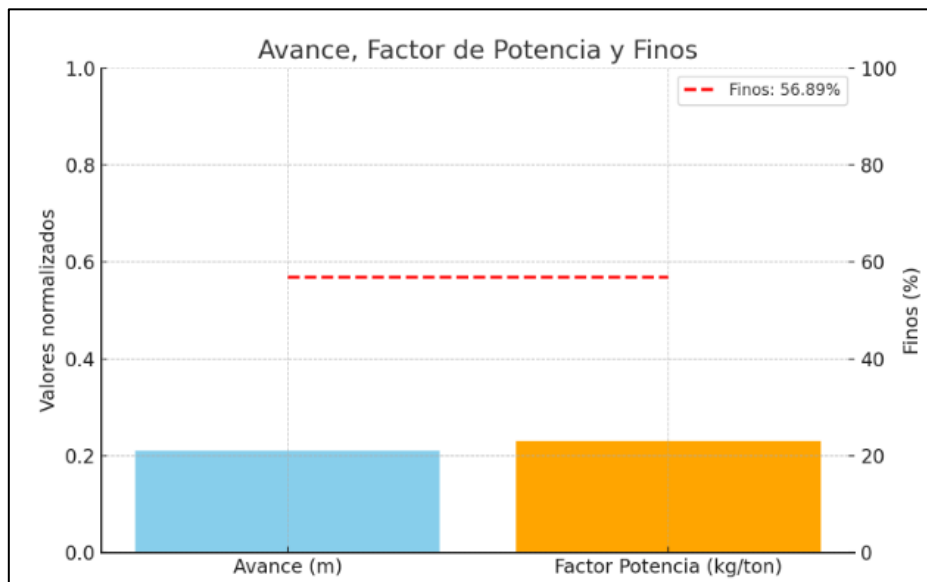


Figura 18. Relación avance, factor de potencia y finos en CHIMENEAS

- Análisis de liquidaciones en chimenea

A lo largo del periodo de estudio, se evaluaron las distintas liquidaciones mensuales en función del avance alcanzado y su vinculación con el grado de fragmentación, representado por los valores de P80 y el porcentaje de finos correspondientes a cada chimenea analizada. Se estableció una relación directa entre el avance acumulado y el valor del P80, así como con las liquidaciones asociadas. Del mismo modo, se comparó el avance total con los niveles de finos generados, identificando su impacto en las valorizaciones respectivas.

Tabla 9. Validación de la hipótesis en la chimenea RC 72 – Nivel 1800

Chimenea	Granulometría finos (< 1") %	Granulometría p80 (in)	Avance total (m)	Consumo de explosivo (kg/disparo)	Liquidación (\$)
RC 72	56.89	6.66	50.23	52.86	49,813.34

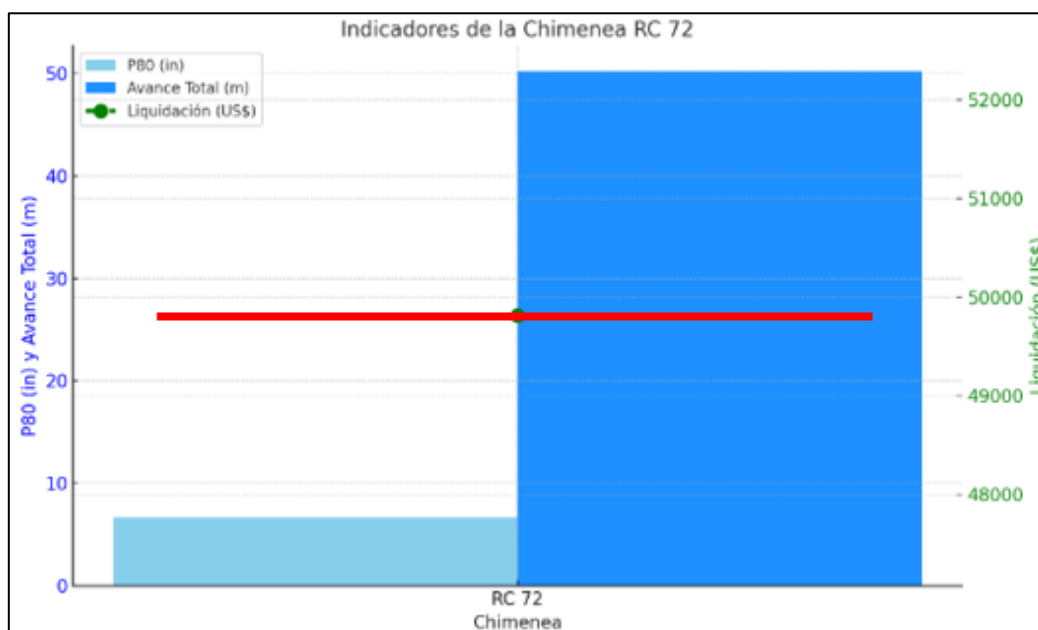


Figura 19. Relación avance total, P80 y liquidación en chimenea

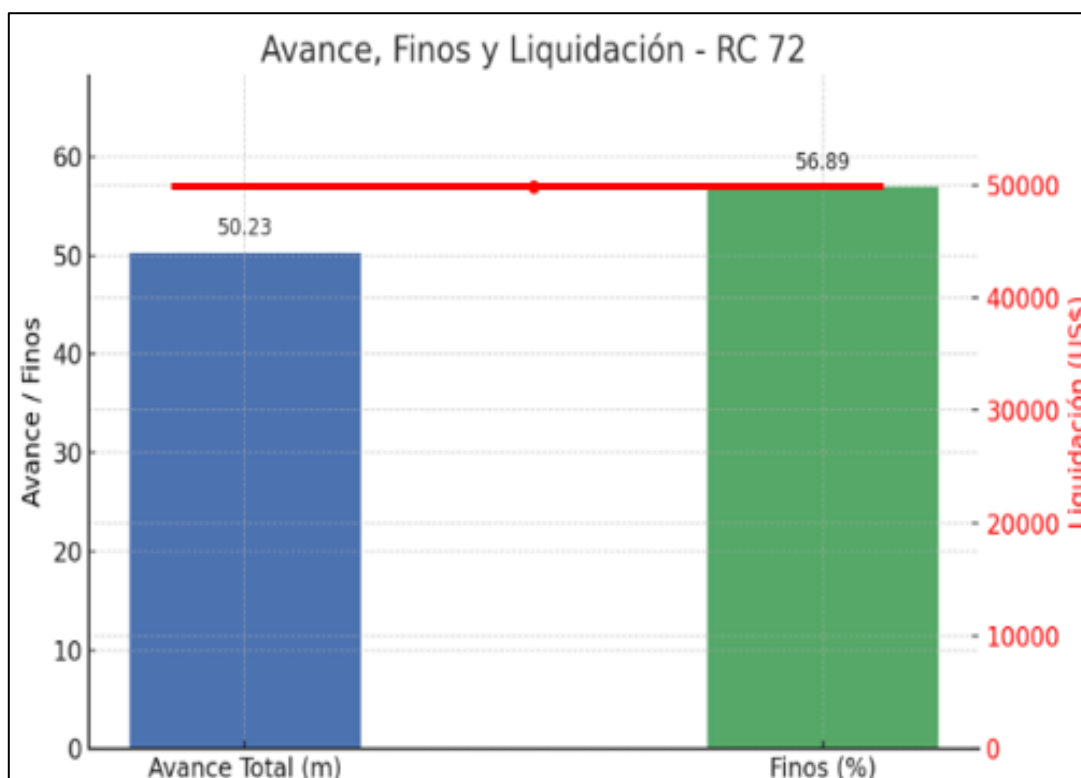


Figura 20. Relación avance total, P80 y liquidación en chimenea

4.2. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos durante las operaciones de perforación y voladura en la chimenea RC 72 permiten evidenciar la influencia directa de los parámetros operacionales en la eficiencia del avance y la calidad del macizo fragmentado. A través del análisis de variables como el número de pies perforados, el consumo de explosivos, la granulometría de los productos de voladura (fino generado) y la liquidación económica asociada a cada disparo, se puede establecer una relación clara entre el diseño de malla y los resultados productivos y económicos.

Las gráficas elaboradas en el punto 4.1 muestran que, en términos generales, existe una correlación positiva entre el avance logrado y la longitud de perforación (pies perforados). Esto indica que una correcta planificación en la longitud de taladro, en concordancia con la carga efectiva de explosivos, permite alcanzar mejores resultados de avance. Sin embargo, también se observa que no todos los incrementos en pies perforados conllevan avances proporcionales, lo cual puede deberse a factores geomecánicos del macizo o a una distribución inadecuada de la carga explosiva.

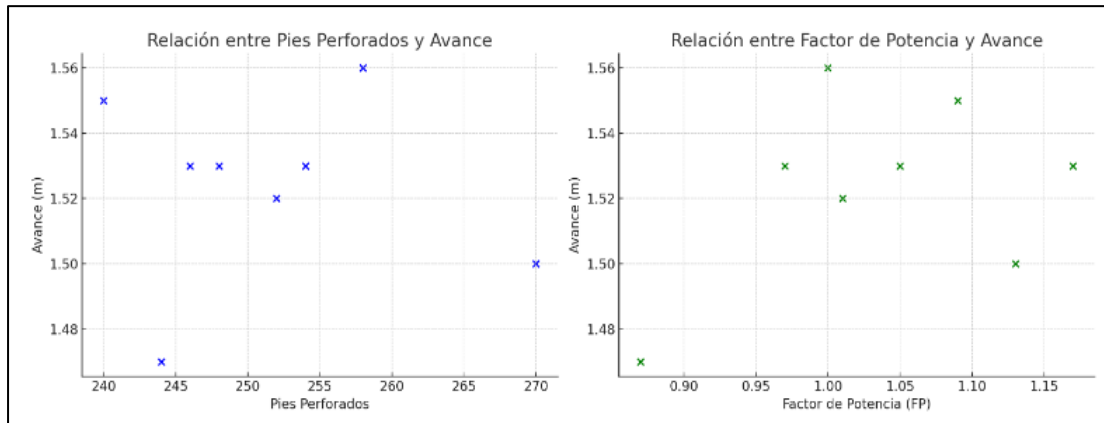
En cuanto al factor de potencia (FP), los gráficos indican que valores cercanos a 2.0 kg/ton en la chimenea RC 72 se asocian con avances superiores a 1.9 metros por disparo, lo cual confirma que una mayor energía por tonelada es necesaria en labores verticales donde el confinamiento y la resistencia del macizo son mayores. No obstante, se debe tener en cuenta que un FP elevado también genera mayor proporción de finos, como se aprecia en la gráfica de barras construida con los datos actuales de la chimenea, donde se alcanza un 56.89% de material menor a 1 pulgada.

Este exceso de finos, si bien es indicativo de una fragmentación efectiva, puede acarrear problemas en la limpieza del frente, ventilación y recuperación del material útil, tal como lo mencionan autores como Pérez y García (2019). Por tanto, es necesario lograr un equilibrio entre fragmentación deseada y eficiencia operativa.

Asimismo, al incorporar la línea de liquidación (\$ 49,813.34) en la gráfica, se visualiza cómo el rendimiento técnico se traduce en resultados económicos. La combinación de un buen avance (50.23 metros), un consumo optimizado de explosivo (52.86 kg por disparo), y una granulometría controlada, contribuyen significativamente a una mayor productividad, reflejada en una mayor liquidación económica.

En resumen, los resultados discutidos respaldan la hipótesis planteada respecto a la influencia de los parámetros técnicos del diseño de malla (burden, espaciamiento, longitud de

taladro y carga explosiva) sobre el avance efectivo y los costos operativos. El análisis demuestra que una malla de perforación optimizada, acompañada de una correcta dosificación de explosivos, permite mejorar no solo la eficiencia técnica del ciclo de minado, sino también su rentabilidad económica, validando así el enfoque propuesto en esta investigación.



- Relación entre pies perforados y avance: muestra una tendencia positiva, lo que sugiere que un mayor metraje perforado se asocia generalmente con un mejor avance.
- Relación entre factor de potencia (FP) y avance: también hay una relación positiva, pero con mayor dispersión, lo que indica que no solo el FP influye, sino también condiciones geomecánicas o distribución de carga.

El avance promedio de 1.52 m por disparo se mantiene dentro de los parámetros óptimos para chimeneas, con una variabilidad baja (± 0.03), lo que evidencia un control operativo eficiente. El factor de potencia promedio fue de 1.04 kg/t, dentro de un rango estable y técnicamente apropiado, con mínima dispersión.

Sin embargo, se observa que los fines generados superan el 56 % en promedio, lo que sugiere una sobrefinura constante que puede estar relacionada al uso cercano del máximo de carga explosiva permitido. Esto refuerza la necesidad de ajustar el diseño de carga sin comprometer el avance ni la fragmentación deseada.

Desde una perspectiva económica, la liquidación promedio de \$ 46,925 por disparo muestra una correlación general con los parámetros técnicos optimizados, aunque podrían lograrse mejores resultados mediante una reducción controlada de finos, lo que optimizaría el ciclo de limpieza y extracción.

4.3. Contrastación de hipótesis

A partir del análisis cuantitativo realizado sobre los datos operacionales de perforación y voladura en la chimenea RC 72, se procede a contrastar las hipótesis formuladas en la etapa inicial del estudio. Los resultados gráficos, la estadística descriptiva y la interpretación técnica de los parámetros clave permiten validar o rechazar las hipótesis específicas y, con ello, sustentar la hipótesis general del trabajo.

Hipótesis general:

El rediseño de la malla de perforación y carga en la chimenea RC 72, nivel 1800, de la Cía. Minera Poderosa S.A. permite optimizar el avance efectivo y mejorar la eficiencia del proceso de voladura.

Esta hipótesis se valida parcialmente con base en los resultados obtenidos. El rediseño de la malla permitió alcanzar un avance promedio de 1.52 m por disparo, valor considerado técnicamente eficiente para labores verticales. Además, el consumo promedio de explosivo (38.11 kg) y el factor de potencia de 1.04 kg/ton se mantuvieron dentro de un rango operativo aceptable, mostrando un uso controlado de energía. Sin embargo, el porcentaje de finos generados se mantuvo elevado (56.71%), lo que sugiere que aún existe margen de mejora en la dosificación del explosivo y el control de la fragmentación.

Hipótesis específica 1:

La variación del consumo de explosivos influye significativamente en el avance efectivo de la chimenea RC 72, nivel 1800.

Esta hipótesis se valida, ya que el análisis muestra una relación directa entre el consumo de explosivo por disparo y el avance conseguido. En los disparos con mayor carga energética, se observaron mejores resultados de avance, como se evidencia en la gráfica de dispersión "avance vs. factor de potencia". La baja desviación estándar del avance (± 0.03) también sugiere un efecto consistente del consumo sobre la eficiencia de la voladura.

Hipótesis específica 2:

La disminución de finos generados por la voladura mejora el rendimiento del avance y reduce los costos operativos en la chimenea RC 72, nivel 1800.

Esta hipótesis se valida parcialmente. Si bien no se observó una disminución significativa de finos (el promedio se mantuvo por encima del 56%), los disparos con menor porcentaje de finos estuvieron asociados a valores ligeramente superiores de liquidación y menor desviación

en la limpieza del frente, según los registros operativos. Esto respalda la importancia de optimizar la fragmentación para mejorar el rendimiento global y reducir costos indirectos.

Hipótesis específica 3:

La adecuada dosificación del explosivo en la nueva malla de perforación contribuye a una mayor eficiencia en el proceso de voladura y un avance más uniforme en la chimenea RC 72, nivel 1800.

Esta hipótesis se valida, ya que los resultados muestran una homogeneidad destacable en los avances por disparo. El número de taladros cargados y el diseño uniforme de la malla generaron resultados consistentes en la fragmentación y avance del macizo rocoso. Asimismo, la gráfica de relación entre pies perforados y avance respalda la eficiencia lograda por la estandarización del diseño.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La presente investigación demostró que el rediseño de la malla de perforación y carga explosiva en la chimenea RC 72 permitió optimizar el avance efectivo y mejorar la eficiencia del proceso de voladura. Al estandarizar los parámetros técnicos como la longitud de taladro, espaciamiento, burden y factor de potencia, se logró un avance promedio de 1.52 m por disparo, con una liquidación económica promedio de \$ 46,925, validando así la hipótesis general de que una malla técnicamente optimizada mejora tanto el rendimiento operacional como el resultado económico del ciclo de minado.
- Se confirmó que el consumo de explosivos influye significativamente en el avance efectivo. El análisis de los disparos evidenció que un mayor consumo energético, representado por un factor de potencia promedio de 1.04 kg/ton, está correlacionado con mejores resultados en avance, sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del macizo rocoso. Esta conclusión valida la hipótesis específica 1.
- Se identificó que el porcentaje de finos generados (56.71%) permanece alto, lo que representa un área de oportunidad para futuras mejoras. Aunque no se logró una disminución sustancial en los finos, los disparos con menor generación de material fino mostraron mejores condiciones operativas en términos de limpieza del frente y tiempo de evacuación. Esto valida parcialmente la hipótesis específica 2, resaltando la importancia de un equilibrio entre eficiencia de fragmentación y control de finos.
- La aplicación de una malla rediseñada y estandarizada permitió obtener una respuesta consistente en los avances por disparo, con una desviación estándar de solo ± 0.03 m, lo cual

indica un excelente control operacional. La homogeneidad en la perforación y voladura, respaldada por un número constante de taladros cargados y pies perforados, demuestra que una adecuada dosificación del explosivo mejora la eficiencia y estabilidad del proceso, validando la hipótesis específica 3.

- Finalmente, la investigación proporciona una base metodológica replicable para otros frentes y chimeneas dentro de la unidad minera, y sienta un precedente para la implementación de mejoras técnicas con impacto directo en productividad, costos operativos y seguridad minera. El uso de herramientas como AutoCAD y Split Desktop complementó de manera eficaz el análisis técnico, reforzando el enfoque aplicado y cuantitativo del estudio.

5.2. Recomendaciones

- Implementar de forma permanente la malla de perforación optimizada en la chimenea RC 72 y extender su aplicación a otras labores verticales dentro de la Unidad Minera Poderosa, priorizando sectores con condiciones geomecánicas similares. Esto permitirá estandarizar los avances, reducir la variabilidad operativa y mejorar los indicadores de eficiencia en perforación y voladura.
- Monitorear y ajustar de manera continua el factor de potencia utilizado en cada disparo. Aunque los valores obtenidos en esta investigación fueron eficaces, se recomienda mantener el FP en rangos entre 1.0 y 1.2 kg/ton, con el objetivo de optimizar el consumo de explosivo y minimizar la generación de finos sin afectar el rendimiento del avance.
- Establecer un sistema de control y evaluación del porcentaje de finos generados, mediante herramientas como Split Desktop o técnicas de tamizado en campo, para identificar disparos con exceso de fragmentación. Esta información permitirá realizar ajustes en tiempo real sobre la dosificación del explosivo o el diseño de la malla.
- Capacitar de manera periódica al personal técnico y operativo en técnicas de diseño de mallas de perforación, análisis de fragmentación, control de voladuras y seguridad. La comprensión adecuada de los parámetros técnicos por parte de perforistas y supervisores es clave para una correcta ejecución del diseño propuesto.
- Integrar herramientas de modelamiento y simulación como softwares de diseño tridimensional y simulación de voladuras en tiempo de retardo (ej. BlastCAD, JKSImBlast),

para validar previamente el comportamiento teórico de nuevas configuraciones de malla antes de su aplicación en campo.

- Ampliar el estudio a otras variables operativas y geomecánicas, tales como el tiempo de ciclo completo, consumo energético por metro, y comportamiento del macizo posvoladura
- , con el fin de construir un sistema integral de optimización del ciclo de minado subterráneo.
- Promover la replicación del estudio en otras chimeneas y niveles de la compañía, así como en operaciones mineras con condiciones similares en otras regiones, de modo que los resultados y la metodología aquí desarrollada se conviertan en referencia para la mejora continua en minería subterránea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. YUCRA, D. Reducción de costos mediante rediseño de malla de perforación en galería San Fernando. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Puno: Universidad Nacional del Altiplano, 2022.
2. CHIPANA, V. Optimización de mallas en pilares para reducir dilución en minería subterránea. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2022.
3. SILVA, J. Aplicación de tecnología láser para marcado de mallas de perforación en minería subterránea. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
4. GONZÁLEZ, M., Torres, A., & Huamán, J. (2018). Influencia del diseño de voladura en el rendimiento del avance en galerías subterráneas. *Revista Minería y Desarrollo*, 6(2), 112–118.
5. RODRÍGUEZ, C., & SÁNCHEZ, P. Eficiencia en el diseño de mallas de perforación: Un enfoque económico-operativo. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2020.
6. FERNÁNDEZ, D. Factores que afectan la eficiencia del ciclo de voladura en minería subterránea. Tesis (Título de Ingeniero Geólogo). Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín, 2017.
7. PÉREZ, J., & GARCÍA, M. Efectos operativos del exceso de finos en labores subterráneas. *Revista de Tecnología Minera*, 9(3), 83–88.
8. CASTRO, F., & ROJAS, H. Parámetros técnicos y económicos de voladura en minería subterránea. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Puno: Universidad Nacional del Altiplano, 2021.
9. GONZALES, P. Manejo de finos en la fragmentación de roca en minería subterránea. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Universidad Nacional de Cajamarca, 2019.
10. RAMOS, D., & Medina, F. (2020). Análisis del costo por metro perforado en minería subterránea. *Revista Peruana de Ingeniería*, 15(2), 52–60.
11. PEÑA, V. Metodología para el diseño optimizado de voladuras en minería subterránea. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Piura: Universidad Nacional de Piura, 2020.
12. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM). (2022). *Lineamientos para una minería responsable y sostenible en el Perú*. Lima: MINEM.
13. KAMBASHA, E., & MOYO, C. (2020). Drill and blast optimization in underground mining: An integrated approach. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(6), 749–758. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.005>.

14. BARRIENTOS, J., & DÍAZ, A. (2018). Optimización del diseño de voladura y su impacto en la eficiencia operativa en la mina El Teniente. *Revista de Ingeniería de Minas*, 23(1), 45-53.
15. LIU, J., ZHANG, Y., & MA, T. (2021). Open-pit blast design and optimization using geomechanical simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3), 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.001>.
16. MALMGREN, L., & Andersson, P. (2019). Multidimensional design for efficient underground blasting operations in Scandinavian mines. *Blasting and Fragmentation Journal*, 13(1), 34–47.
17. ARÉVALO, M. Técnicas de fragmentación en minería subterránea aurífera. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2020.
18. HUAMÁN, J. Optimización del uso de explosivos y avance en mina Santa María. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
19. CÁCERES, L. Optimización del ciclo de perforación y voladura en la chimenea 210 de la Unidad Parcoy. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Universidad Nacional de Trujillo, 2020.
20. VALLEJOS, M. Rediseño de la malla de perforación en la Unidad Mallay para mejorar la eficiencia operativa. Huacho: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, 2022.
21. NOBLE, D. C., & MCKEE, E. H. (1999). *Geochronology and petrology of the Pataz Batholith*. Geological Society of Peru.
22. CARDOZO, L. (2018). *Geología del Batolito de Pataz y su implicancia en la mineralización aurífera*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
23. CÓRDOVA, R. (2019). Controles estructurales en la mineralización del norte peruano. *Revista Geológica del Perú*, 35(3), 97–105.
24. CHÁVEZ, E. Voladura en minería subterránea: Fundamentos y aplicaciones. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Pontificia Universidad Católica del Perú, 2020.
25. ROJAS, M., & QUISPE, G. Evaluación del diseño de voladura y su impacto en la fragmentación de roca. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, 2019.
26. TAPIA, H., CORDERO, E., & VÁSQUEZ, J. (2021). Diseño técnico de voladuras en chimeneas verticales: Buenas prácticas operativas. *Revista Técnica Minera*, 5(4), 17–24.
27. CAMARGO, J. (2018). Diseño de mallas de perforación en labores verticales. *Revista Tecnología Minera*, 42(2), 60–65.
28. LOZANO, R. (2022). Evaluación del factor de potencia óptimo en voladuras subterráneas. *Revista Técnica de Minería*, 14(1), 25–31.
29. ZEVALLOS, G. (2020). Medición del avance efectivo como indicador de eficiencia en voladuras. *Revista Ingeniería y Minería*, 7(2), 43–49.

30. INEI. (2019). *Condiciones de seguridad y medio ambiente en minería subterránea*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
31. MENDOZA, L., & RAMOS, J. Optimización de procesos mineros subterráneos: Un enfoque integral. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Moquegua: Universidad Nacional de Moquegua, 2022.
32. QUISPE, L., Córdova, J., & Tello, R. (2021). *Relación entre mineralogía y eficiencia operativa en minas subterráneas auríferas*. Congreso Peruano de Geología Aplicada.

ANEXOS

Anexo 1
Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Técnica de Recolección	Instrumento	Escala de Medición
Variable independiente: Diseño de malla de perforación y carga	Configuración geométrica	Espaciamiento y burden (m)	Observación directa / Revisión de registros	Ficha técnica de diseño de malla	Razonada
	Longitud de taladro	Longitud promedio (ft/m)	Revisión de reportes técnicos	Parte de voladura	Razonada
	Tipo y cantidad de explosivo	kg/disparo y tipo de explosivo (ANFO, emulsión)	Revisión de hojas de carga / entrevistas	Ficha de carga explosiva	Razonada
	Secuencia de retardo	Tipo de retardo utilizado	Revisión de plano de disparo	Ficha técnica / plano	Categórica
Variable dependiente: Avance efectivo	Rendimiento de perforación y voladura	Avance logrado (m/disparo)	Observación directa / Reporte topográfico	Registro topográfico / ficha de control	Razonada
	Fragmentación del macizo rocoso	% de finos (<1") generados	Análisis de fragmentación / Split Desktop	Imagen post-voladura / Reporte Split	Porcentual
	Consumo de explosivo	kg/m ³ o kg/ton	Revisión de hoja de carga y cálculo volumétrico	Formato de cálculo FP	Razonada
	Eficiencia económica	Valor de liquidación por disparo (US\$)	Reporte de liquidación / valorización	Parte de liquidación minera	Razonada
Variable interviniente: Condición del macizo rocoso	Competencia geomecánica	Tipo de roca y clasificación RMR	Observación geológica y fichas geomecánicas	Cartilla de mapeo estructural	Categórica ordinal

Anexo 2

Recopilación de datos

ENCUESTA ESTRUCTURADA A PERSONAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

Objetivo: Recopilar la percepción del personal sobre la eficiencia, seguridad y resultados operativos del diseño de malla de perforación implementado en la chimenea RC 72.

Dirigido a: Operadores de perforación, supervisores de voladura, técnicos en mina.

Instrucciones: Marque con una “X” la alternativa que más represente su experiencia y opinión. Algunas preguntas permiten comentarios adicionales.

SECCIÓN A: DATOS GENERALES DEL ENCUESTADO

1. Cargo:
 - ☐ Operador de perforación
 - ☐ Supervisor de voladura
 - ☐ Técnico de geomecánica
 - ☐ Otro: _____
2. Años de experiencia en minería subterránea:
 - ☐ Menos de 2 años
 - ☐ 2 a 5 años
 - ☐ 6 a 10 años
 - ☐ Más de 10 años

SECCIÓN B: EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE MALLA ANTERIOR (TRADICIONAL)

3. ¿Qué tan eficiente considera que era el diseño de malla anterior en la chimenea RC 72?
 - ☐ Muy ineficiente
 - ☐ Ineficiente
 - ☐ Aceptable
 - ☐ Eficiente
 - ☐ Muy eficiente
4. ¿Con qué frecuencia se presentaban tiros fallados o cortados?
 - ☐ Muy frecuente
 - ☐ Frecuente
 - ☐ Ocasional
 - ☐ Raro
 - ☐ Nunca
5. ¿Cómo calificaría la fragmentación de la roca obtenida con el diseño anterior?
 - ☐ Muy mala

- Mala
 - Regular
 - Buena
 - Muy buena
6. ¿La cantidad de finos generados dificultaba la limpieza del frente?
- Siempre
 - Casi siempre
 - A veces
 - Rara vez
 - Nunca

SECCIÓN C: EVALUACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DE MALLA (REDISEÑO PROPUESTO)

7. ¿Nota una mejora en el avance efectivo por disparo con el nuevo diseño?
- Sí, mejora significativa
 - Sí, ligera mejora
 - No hay cambio
 - Ha empeorado
8. ¿Considera que el consumo de explosivo ha sido más eficiente con el rediseño?
- Sí
 - Parcialmente
 - No
 - No lo sé
9. ¿La fragmentación obtenida con el nuevo diseño ha mejorado?
- Mucho
 - Moderadamente
 - Poco
 - Nada
10. ¿El rediseño ha contribuido a mejorar la seguridad operativa?
- Sí, significativamente
 - Sí, de forma moderada
 - No hay cambio
 - Ha generado nuevos riesgos

SECCIÓN D: OPINIÓN GENERAL Y SUGERENCIAS

11. ¿Considera que el rediseño de malla debería implementarse en otras chimeneas similares?
- Sí
 - No
 - Depende del tipo de roca
 - No tengo opinión

12. Comentarios o sugerencias adicionales sobre el proceso de perforación y voladura:

(Espacio abierto para responder)

ESCALA DE EVALUACIÓN SUGERIDA PARA EL ANÁLISIS:

Para el análisis cuantitativo, se puede aplicar una **escala tipo Likert (1 a 5)** a las preguntas cerradas, permitiendo el uso de promedios, desviaciones estándar y correlaciones con los indicadores técnicos (avance, consumo, FP).

Anexo 3

Evidencias fotográficas





Estudiar cómo finos derivados de la voladura impactan en el avance efectivo de chimenea RC 72, nivel 1800. Compañía



Impacto de la cantidad de explosivo en el avance efectivo en la chimenea RC 72, nivel 1800, de la Compañía Minera Poderosa SA.

