Universidad Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

Técnicas de control en perforación para disminuir el costo por metro lineal del Sub Nivel 75-2 Este, Unidad Minera San Cristóbal

Cesar Cisneros Hinostroza
Magno Sinche Ravelo

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	**:**	Decano de la Facultad de Ingeniería
DE	**:**	Rafael Carrasco Soto Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO	**:**	Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA	**:**	13 de Junio de 2025

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

TÍTULO:
TÉCNICAS DE CONTROL EN PERFORACIÓN PARA DISMINUIR EL COSTO POR METRO LINEAL DEL SUB NIVEL 75-2 ESTE, UNIDAD MINERA SAN CRISTÓBAL

Autores:
1. Cesar Cisneros Hinostroza – EAP Ingeniería de Minas
2. Magno Sinche Ravelo – 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 15 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI [X] NO [ ]
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores SI [ ] NO [X]
  N° de palabras excluidas **(00)**:
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI [ ] NO [X]

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,

Rafael Carrasco Soto
Asesor de trabajo de investigación

ASESOR

Ing. Rafael Carrasco Soto

DEDICATORIA

Yo Cesar, dedico esta tesis a mi hija y esposa: mi compañera de vida, por su amor incondicional, su paciencia infinita y por ser mi motivación en cada momento de este camino. A mis padres, quienes me dieron las herramientas para soñar y la fortaleza para hacer esos sueños realidad. Su ejemplo, sacrificios y apoyo constante son el pilar sobre el que se construye este logro. A mi abuelo, cuya sabiduría y palabras siempre han sido una guía en mi vida. A mis hermanos, mis primeros amigos y compañeros de vida. Gracias por su apoyo, por estar siempre a mi lado y por recordarme que en familia todo es posible. A todos ustedes, dedico este esfuerzo y este logro.

Yo, Magno, dedico esta tesis a Dios, quien me ha brindado fuerza, sabiduría y resistencia en cada paso de este camino académico. A mi querida madre, a mis hermanos, y a mi pareja por su apoyo incondicional. A ti padre: aunque estés en el cielo, tu legado de perseverancia y sacrificio continuo me inspira cada día. Este logro también es tuyo.

AGRADECIMIENTO

A la prestigiosa Universidad Continental. A los ingenieros catedráticos de la EAP de Ingeniería de Minas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ASESOR iv
DEDICATORIA v
AGRADECIMIENTO vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS vii
ÍNDICE DE TABLAS ix
ÍNDICE DE FIGURAS x
RESUMEN xi
ABSTRACT xii
INTRODUCCIÓN xiii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO 14
1.1 Planteamiento y formulación del problema 14
1.1.1 Planteamiento del problema 14
1.1.2 Formulación del problema 15
1.2 Objetivos 15
1.2.1 Objetivo general 15
1.2.2 Objetivo específicos 15
1.3 Justificación e importancia 15
1.4 Hipótesis 16
1.4.1 Hipótesis general 16
1.4.2 Hipótesis específicas 16
1.5 Identificación de variables 16
1.5.1 Variable independiente 16
1.5.2 Variable dependiente 16
1.5.3 Matriz de operacionalización de variables 17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 18
2.1. Antecedentes de la investigación 18
2.1.1 Antecedentes nacionales 18
2.2. Generalidades de la Unidad Minera San Cristóbal 20
2.2.1 Ubicación y accesibilidad 20
2.2.2 Geología regional 21
2.2.3 Geología local 21
2.2.4 Geología estructural 23
2.2.5 Geología económica 23
2.3. Bases teóricas 24

2.3.1 Técnicas de control en perforación del Sub Nivel 75-2 Este, Unidad Minera San Cristóbal 24
CAPÍTULO III: MÉTODOLOGÍA 40
3.1 Método y alcances de la investigación 40
3.1.1 Métodos de la investigación 40
3.2 Alcances de la investigación 40
3.3 Diseño de la investigación 41
3.4 Población y muestra 41
3.3.1 Población 41
3.3.2 Muestra 41
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos 41
3.4.1 Técnicas utilizadas en la recolección de datos 41
3.4.2 Instrumentos utilizados en la recolección de datos 41
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 42
4.1 Desarrollar las técnicas de control en perforación para disminuir el costos por metro lineal del Sub Nivel 75-2 Este, Unidad Minera San Cristóbal 42
4.1.1 Evaluación de las condiciones actuales Sub Nivel 75-2 Este 44
4.2 Realizar la caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal 50
4.2.1 Cálculo del RMR (Rock Mass Rating) 51
4.3 Realizar el cambio de los parámetros de perforación para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 52
4.2.2 Estado situacional de los parámetros de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este 52
4.2.3 Análisis del costo actual de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 60
4.2.4 Análisis de la optimización de los parámetros de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este 62
4.2.5 Análisis del costo optimo de la perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 70
4.4 Prueba de hipótesis 72
4.4.1. Prueba de hipótesis general 72
4.4.2. Análisis de datos 73
CONCLUSIONES 76
RECOMENDACIONES 77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78
ANEXOS 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables 17
Tabla 2. Accesibilidad 20
Tabla 3. Inspección del macizo rocoso (Clasificación RMR) 26
Tabla 4. Clasificación final (suma total de puntos) 27
Tabla 5. Análisis de mallas existentes 28
Tabla 6. Análisis de mallas existentes 29
Tabla 7. Optimización de los parámetros de voladura 30
Tabla 8. Supervisión y evaluación de la perforación y voladura 32
Tabla 9. Análisis de costos y eficiencia operativa 35
Tabla 10. Parámetros clave de la perforación y del equipo del Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal 46
Tabla 11. Parámetros voladura del Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal 47
Tabla 12. Supervisión y evaluación de la perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este – Unidad Minera San Cristóbal 48
Tabla 13. Análisis de costos y eficiencia operativa: Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 49
Tabla 14. Caracterización del macizo rocoso del Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal 50
Tabla 15. Estado situacional de los últimos 15 disparos del Subnivel 75-2 este 57
Tabla 16. Medición de los parámetros actuales de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este 60
Tabla 17. Estado óptimo - Fallas operativas del equipo de perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 66
Tabla 18. Estado óptimo de los últimos 15 disparos del Subnivel 75-2 este 67
Tabla 19. Medición de los parámetros óptimos de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este 70
Tabla 20. Comparación de los quince disparos en el escenario actual y optimo del Subnivel 75-2 este 74
Tabla 21. Estadísticas de muestras relacionadas 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Accesibilidad 20
Figura 2. Plano geológico 21
Figura 3. Columna estratigráfica 22
Figura 4. Metodología de la perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 25
Figura 5. Metodología de la perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 43
Figura 6. Mapeo geomecánico del Sub Nivel 75-2 Este de la Unidad Minera San Cristóbal 45
Figura 7. Estado actual: Diseño de la malla de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este 53
Figura 8. Estado situacional - Parámetros de perforación del equipo Boomer S1D 55
Figura 9. Estado situacional - Fallas operativas del equipo de perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal 55
Figura 10. Situación actual - análisis de la sobrerotura en el Subnivel 75-2 este 58
Figura 11. Situación actual de la evaluación de fragmentación en el Subnivel 75-2 este 59
Figura 12. Evaluación de los costos de perforación y voladura en función de los parámetros actuales de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este 61
Figura 13. Optimización del diseño de la malla de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este 63
Figura 14. Estado óptimo - Parámetros de perforación del equipo Boomer S1D 65
Figura 15. Situación óptima - análisis de la sobrerotura en el Subnivel 75-2 este 68
Figura 16. Situación óptima evaluación fragmentación en el Subnivel 75-2 este 69
Figura 17. Evaluación de los costos de perforación y voladura en función a los parámetros óptimos de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este 71

RESUMEN

Este estudio tuvo como propósito desarrollar las técnicas de control en perforación para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal. Se empleó el método científico como enfoque general, complementado con el método inductivo-deductivo. La investigación fue de tipo aplicada, con nivel descriptivo y diseño experimental. La población considerada incluyó todos los subniveles de la zona II de la Unidad Minera San Cristóbal, seleccionando como muestra específica el Subnivel 75-2 este de la zona II. La recopilación de datos se realizó mediante técnicas de observación, analizando información actual de los procesos de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este.

En el escenario actual del Subnivel 75-2 este, el avance fue de 2.51 metros por disparo con un costo de $176.39 por metro lineal, marcado por sobreroturas significativas (11 % en hastiales y 12 % en corona) y fragmentación inadecuada (P80 de 9.36"). Factores como fallas en equipos y manejo ineficiente, aumentaron los costos y afectaron la estabilidad.

En el escenario óptimo, el avance mejoró a 3.50 metros por disparo, reduciendo costos a $119.22 por metro lineal, con sobreroturas mínimas (2.5 % en hastiales y 3 % en corona) y fragmentación adecuada (P80 de 4.79"). Se logró un ahorro de $57.17 por metro lineal y un incremento de 1 metro adicional por disparo, mejorando significativamente la productividad.

Palabras clave: técnicas de control en perforación y voladura.

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop drilling control techniques to reduce the cost per linear meter of Sub Level 75-2 East, San Cristóbal Mining Unit. The scientific method was used as a general approach, complemented by the inductive-deductive method. The research was of an applied type, with a descriptive level and experimental design. The population considered included all the Sub Levels of Zone II of the San Cristóbal Mining Unit, selecting Sub Level 75-2 East of Zone II as a specific sample. Data collection was carried out using observation techniques, analyzing current information on the drilling and blasting processes of Sub Level 75-2 East.

In the current scenario of Sublevel 75-2 East, the advance was 2.51 meters per shot with a cost of $176.39 per linear meter, marked by significant overbreaks (11% in gables and 12% in crown) and inadequate fragmentation (P80 of 9.36"). Factors such as equipment failures and inefficient management increased costs and affected stability.

In the optimal scenario, the advance improved to 3.50 meters per shot, reducing costs to $119.22 per linear meter, with minimal overbreaks (2.5% in gables and 3% in crown) and adequate fragmentation (P80 of 4.79"). A saving of $57.17 per linear meter and an increase of 1 additional meter per shot were achieved, significantly improving productivity.

Keywords: control techniques in drilling and blasting.

INTRODUCCIÓN

En el Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal, las técnicas de control en perforación son un componente crítico para maximizar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados al avance lineal. Estas técnicas abarcan desde la correcta selección y uso de herramientas y equipos de perforación hasta la aplicación precisa de parámetros operativos que se ajusten a las características específicas del macizo rocoso. Sin un enfoque meticuloso en el control de la perforación, los resultados a menudo incluyen sobrecostos, retrasos operativos y una disminución significativa en la calidad del avance.

Adicionalmente, las variaciones geológicas del macizo rocoso como los cambios en la dureza, fracturación o presencia en el frente de avance, representan un reto significativo. Estas características pueden causar sobrerotura en los contornos, afectando la estabilidad de los frentes de trabajo y aumentando los costos de sostenimiento y limpieza. También pueden provocar desviaciones en los taladros, lo que disminuye la efectividad de las voladuras subsiguientes y afecta la granulometría del material fragmentado.

Las deficiencias detectadas en el proceso actual pueden ser el resultado de múltiples factores. Uno de los más relevantes es el uso inadecuado de los parámetros de perforación, como el diámetro, la longitud y la inclinación de los taladros, así como la presión de aire o agua aplicada durante el proceso. Este factor, cuando no se ajusta adecuadamente, puede llevar a taladros mal direccionados o sobre excavaciones, incrementando la cantidad de sostenimiento necesario y generando costos adicionales.

El desgaste prematuro de herramientas como barras y brocas también es un desafío recurrente que afecta directamente los costos operativos y el tiempo de ciclo. Esto puede estar relacionado con un mantenimiento deficiente, una selección incorrecta de herramientas para el tipo de roca o la falta de capacitación adecuada de los operadores.

La falta de estandarización en las prácticas operativas y la ausencia de monitoreo continuo en las perforadoras generan variabilidad en la calidad y eficiencia del trabajo, dificultando la corrección de desviaciones en los parámetros. Para superar estas deficiencias, es clave implementar sistemas automatizados de monitoreo, programas de mantenimiento predictivo y capacitación constante. Estas medidas mejoran la uniformidad del avance, optimizan recursos y reducen costos, contribuyendo a la sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones en el Subnivel 75-2 este.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

La aplicación de técnicas de control en perforación ha demostrado ser fundamental para reducir los costos por metro lineal en el sector minero y de construcción, optimizando así los recursos y generando un impacto positivo en la rentabilidad de estas industrias a nivel global. En el ámbito internacional, los países con fuerte desarrollo minero han implementado técnicas avanzadas de monitoreo y control que van desde el uso de tecnologías de punta como sensores en tiempo real y sistemas de captura de datos, hasta la automatización de ciertos aspectos del proceso de perforación. Estas innovaciones permiten ajustar variables críticas como la presión de avance, la velocidad de rotación y la carga aplicada, adaptando el proceso de perforación a las condiciones exactas del terreno. Esta capacidad de ajustar parámetros en tiempo real reduce el desgaste del equipo y la probabilidad de averías, lo que a su vez minimiza los tiempos de inactividad y maximiza la vida útil de las herramientas de perforación. Como resultado, estas prácticas generan un ahorro considerable en cada metro perforado, además de promover operaciones más sostenibles al reducir el consumo de recursos y la generación de residuos.

A nivel nacional, las compañías mineras han encontrado maneras de adaptar estas técnicas a las particularidades geológicas y económicas del país, logrando optimizar los costos de perforación en función de los recursos disponibles y las características específicas del terreno. Para ello, la implementación de controles de calidad y de programas de mantenimiento preventivo ha sido clave para garantizar la disponibilidad y la eficiencia operativa de los equipos. Estas prácticas no solo minimizan el tiempo de inactividad, sino que también contribuyen a la conservación de los equipos, lo cual es esencial en zonas donde el acceso a repuestos y servicios de mantenimiento puede ser limitado. Además, se han adoptado técnicas

específicas para seleccionar las brocas, barras y otros elementos de perforación en función de la dureza y abrasividad de la roca, logrando una mayor precisión y menores costos operativos. A esto se suma la capacitación continua de los operadores, quienes aprenden a realizar ajustes específicos en el campo y optimizar el uso de la maquinaria. De esta manera, incluso en entornos con acceso limitado a tecnología avanzada, la implementación de estas técnicas ha permitido una reducción significativa en los costos de perforación por metro lineal, haciendo que las operaciones mineras sean más competitivas y sostenibles.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1.Problema general

¿Cómo influye las técnicas de control en perforación para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal?

1.1.2.2.Problemas específicos

- ¿Cómo influye la caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal?

- ¿Cómo influye el cambio de los parámetros de perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar las técnicas de control en perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

1.2.2 Objetivo específicos

- Realizar la caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal.

- Realizar el cambio de los parámetros de perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

1.3 Justificación e importancia

En el Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal, la implementación de técnicas de control en perforación es clave para abordar las deficiencias en el avance lineal y reducir el costo por metro lineal. Actualmente, estas deficiencias pueden ser el resultado de varios

factores: uso inadecuado de parámetros de perforación, desgaste prematuro de herramientas, falta de estandarización en la operación de los equipos y variaciones en las características geológicas del terreno, como la dureza o fracturación del macizo rocoso. Sin un control adecuado en la perforación, es común observar sobrerotura, desviación en los taladros, y desgaste elevado de los equipos, lo cual incrementa los costos y retrasa el avance planificado.

La justificación de implementar técnicas de control en perforación en este contexto radica en la capacidad de estas prácticas para optimizar el proceso y reducir los costos. Ajustar los parámetros de perforación en función del terreno permite mejorar la eficiencia de cada disparo, minimizando la sobrerotura y logrando un perfil adecuado del túnel con menor necesidad de intervenciones adicionales. Además, técnicas como el monitoreo constante del estado de las herramientas y el mantenimiento preventivo ayudan a prevenir fallas y reducir el desgaste, disminuyendo así los costos operativos y el tiempo de inactividad. Estas prácticas no solo impactan positivamente en el costo por metro lineal, sino que también mejoran la productividad y la seguridad de la operación, ya que garantizan un avance más controlado y estable en el Subnivel 75-2 este.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

Las técnicas de control en perforación serán factibles y viables para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este será factible para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal.

- El cambio de los parámetros de perforación será factible y viable para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

1.5 Identificación de variables

1.5.1 Variable independiente

Técnicas de control en perforación

1.5.2 Variable dependiente

Disminuir el costos por metro lineal

1.5.3 Matriz de operacionalización de variables

Tabla 1. ***Matriz de operacionalización de variables***

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
V.I.: Técnicas de control en perforación	Las técnicas de control en perforación optimizan la perforación minera, mejorando la eficiencia y reduciendo costos mediante la selección de herramientas adecuadas, ajustes operativos, control de vibraciones y fragmentación, y monitoreo de los taladros. También incluyen mantenimiento preventivo y predictivo para asegurar el rendimiento de los equipos y mejorar la calidad del material extraído.	RMR (Sistema del macizo rocoso) Parámetros de perforación Eficiencia de perforación	• Sistema del macizo rocoso • Tipo de roca • Burden (m) • Espaciamiento (m) • Metros perforados (m)) • Consumo de aceros de perforación (unid.) Longitud de perforación (m) • % de sobre rotura • Avance efectivo (%) • Longitud de carga (m)
V.D.: Disminuir el costo por metro lineal	Disminuir el costo por metro lineal en la perforación minera implica optimizar equipos, herramientas y parámetros operativos, mejorar la malla de perforación, controlar la fragmentación, minimizar la sobrerotura y aplicar mantenimiento adecuado. El uso correcto de explosivos y materiales reduce el tiempo de inactividad y los costos adicionales, mejorando la eficiencia y rentabilidad de la perforación.	Evaluación de costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este	• Costo total por metro lineal de avance ($/m)

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes nacionales

En la tesis titulada: "*Perforación y voladura controlada para mejorar avance y sobrerotura en profundización de Rampa Patrick V - Minera Aurífera Retamas S.A."* se tuvo como objetivo mejorar el avance y controlar la sobrerotura en la profundización de la rampa Patrick V de Minera Aurífera Retamas S.A., evaluando el impacto de la perforación y voladura controlada. Se utilizó el método científico con un enfoque descriptivo-comparativo, tomando como referencia la línea base del plan de minado anual. El análisis se centró en la rampa en zig-zag con una pendiente de -12 %, desde el nivel 2195 hasta el 2070. Se diseñaron mallas de perforación y voladura controlada para las secciones rectas (4,0m x 4,5m) y curvas (4,5m x 4,5m). Los resultados mostraron mejoras en el avance, con un incremento de 2,6 % en la línea recta y 1,6 % en las curvas, además de una reducción de la sobrerotura del 10 % en la línea base al 6 % en la línea recta y 5,5 % en las curvas (1).

En la tesis titulada: "*Optimización de perforación y voladura por el método de Roger Holmberg en minera aurífera Estrella de Chaparra S.A*" se tuvo como objetivo diseñar una malla de perforación utilizando el modelo matemático de Holmberg para optimizar las operaciones de voladura en el tajeo Nuevo Porvenir, en la Unidad Minera Aurífera Estrella, Arequipa. Se aplicó un enfoque descriptivo, analítico y aplicativo con un diseño experimental de corte puro y un método hipotético-deductivo. Se estudiaron los tajeos Santa Teresa y Cecilia, compuestos por rocas de granodiorita y andesita. Los resultados indicaron que la implementación de una sobrecarga de taladros con un burden de 0,45m y la mejora en la malla de perforación aumentaron la longitud efectiva de perforación a 1,71 metros, reduciendo el número de taladros y los costos de perforación y voladura de 11,39 $/TM a 6,68 $/TM.

Además, se incrementó la producción en 11,13 TM/disparo y 28,04 g de oro por disparo, alcanzando el objetivo de producción de 2,45 g de Au/TM (2).

La tesis titulada: "*Diseño de la malla de perforación y voladura para el control y estabilidad del macizo rocoso en la Unidad Minera San Cristóbal*" se centró en el monitoreo de las vibraciones generadas por las voladuras en el Nivel 1380 de la labor TJ SP 9 (Breasting), donde se descubrió que los valores de velocidad de vibración superaban la velocidad crítica, lo que indicaba daños en la periferia de la labor. El análisis del macizo rocoso, clasificado como de calidad regular a mala con un RMR de 21 a 30, indicó que los movimientos sísmicos superiores a 37.880 mm/s podrían causar fracturas. En la labor TJ SP 09 oeste, se identificó que los movimientos sísmicos superiores a 21.514 mm/s generaban posibles fracturas, aunque los resultados de monitoreo mostraron una velocidad de 17.907 mm/s. Para mitigar estos problemas, se realizaron 8 taladros de recorte en la periferia utilizando explosivos de baja potencia, lo que permitió reducir los niveles de vibración, mejorar los resultados de la voladura y proteger la estabilidad de la labor al controlar la sobre rotura (3).

En la tesis titulada: "*Optimización del proceso de perforación y voladura para mejorar la eficiencia de avance y controlar la sobrerotura en los frentes de avance de la unidad minera Cerro Lindo, Nexa Resources S. A. A."* se tuvo el objetivo de optimizar el proceso de perforación y voladura en los frentes de avance de la unidad minera Cerro Lindo, Nexa Resources S.A.A., para mejorar la eficiencia de avance y controlar la sobrerotura. La metodología utilizada fue experimental, manipulando variables para observar sus efectos. Se tomó como muestra el Bp 700 Nv 1550 OB6. Como resultado de la optimización, la eficiencia de avance mejoró de un 88.20 % a un 93.60 %, logrando un avance promedio de 4.85 m. Además, se redujo el porcentaje de sobrerotura del 14.90 % al 8.70 %. Esto contribuyó a una mayor estabilidad del macizo rocoso y permitió cumplir con el plan de avance mensual programado (4).

En la tesis titulada: "*Diseño de malla de perforación y voladura para optimizar la productividad en una mina subterránea en Pataz La Libertad 2020*" se tuvo como objetivo principal elaborar un diseño de malla de perforación y voladura para optimizar la productividad en una mina subterránea en Pataz, La Libertad, en 2020. El estudio fue descriptivo y aplicado, centrado en mejorar la eficiencia de las operaciones unitarias y reducir los costos operativos. Se diseñó una nueva malla de perforación considerando parámetros técnicos del macizo rocoso, simetría del disparo, características del explosivo, y técnicas de carguío y secuencia de salida. En la etapa preliminar, se revisaron fuentes documentales y se identificaron deficiencias en el campo, lo que permitió implementar mejoras. Como resultado, la nueva malla incrementó los

avances por disparo, redujo el factor de carga y generó un ahorro de 109.63 soles por metro lineal, optimizando la productividad de la mina (5).

2.2. Generalidades de la Unidad Minera San Cristóbal

2.2.1 Ubicación y accesibilidad

La Unidad Minera San Cristóbal está ubicada en el distrito de Yauli, provincia de Yauli, departamento de Junín, en la región oriental de la cordillera occidental de los Andes, a una distancia de 180 km de Lima (6).

Tabla 2. ***Accesibilidad***

Ruta	Distancia (km)	Tipo de carretera
Lima – Morococha-*cut off*	155	Asfaltada
Cut Off – Unidad Minera San Cristóbal	25	Afirmada
Total	180	

Tomada del Departamento de Geología de la Unidad Minera San Cristóbal (6)

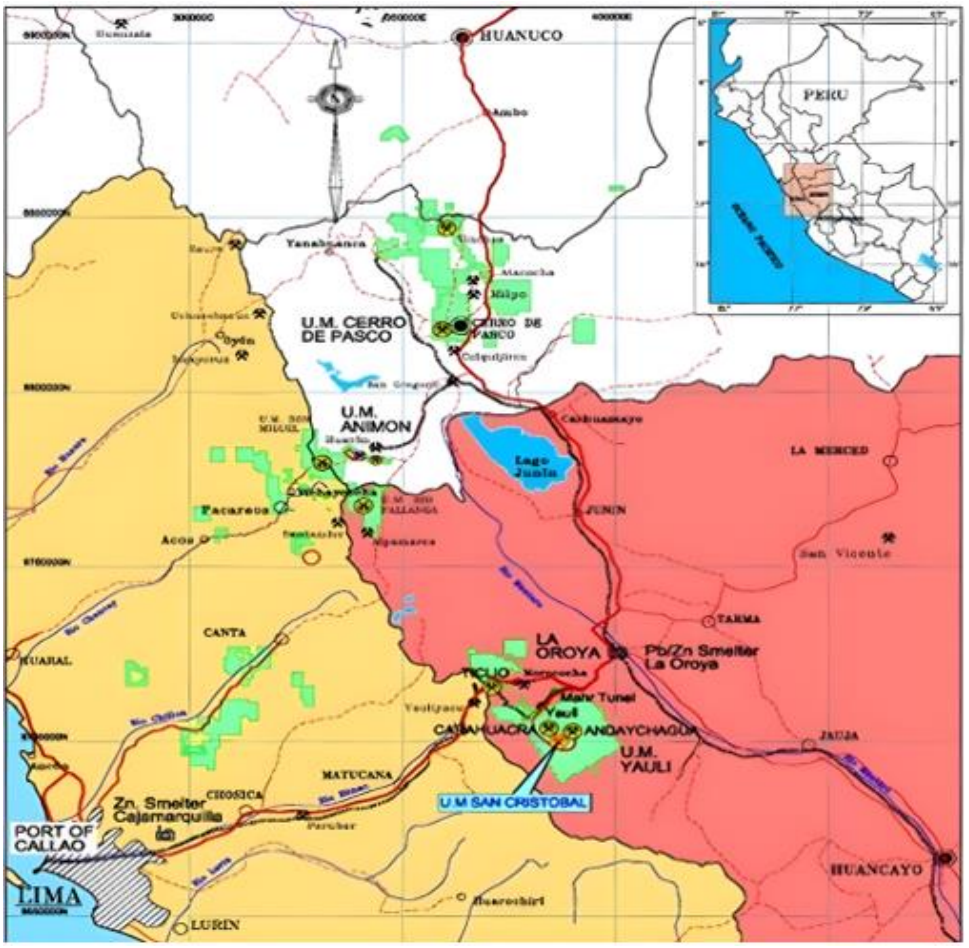


Figura 1. Accesibilidad
Tomada del Departamento de Geología de la Unidad Minera San Cristóbal (6)

2.2.2 Geología regional

El distrito minero de San Cristóbal está integrado dentro del Complejo Domal de Yauli, lo que facilita el acceso a formaciones geológicas del Paleozoico, como los grupos Excélsior y Mitu (6).

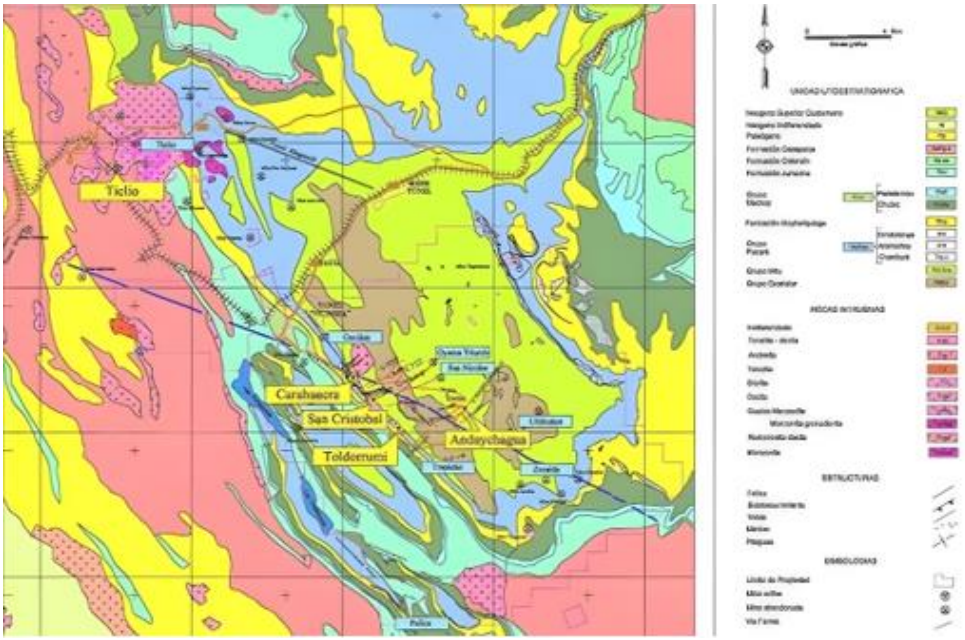


Figura 2. Plano geológico
Tomada del Departamento de Geología de la Unidad Minera San Cristóbal (6)

2.2.3 Geología local

a) Secuencia litológica

La secuencia litológica en la Unidad Minera San Cristóbal abarca desde el Paleozoico hasta el Cretácico superior, tal como se muestra en la figura siguiente.

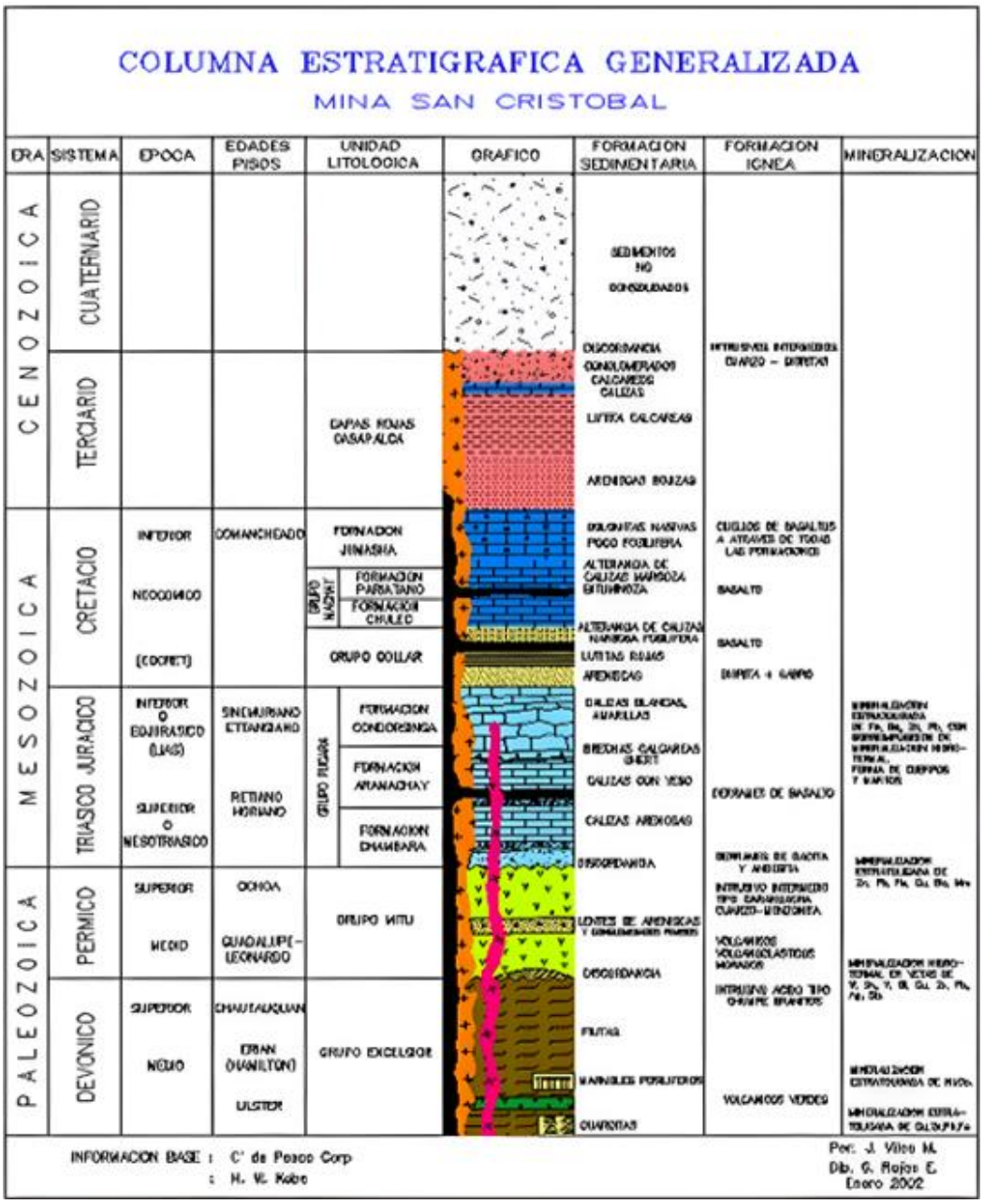


Figura 3. Columna estratigráfica
Tomada del Departamento de Geología de la Unidad Minera San Cristóbal (6)

La secuencia litológica de la Unidad Minera San Cristóbal comprende diversas unidades geológicas:

- **Silúrico-Devónico (grupo Excélsior):** compuesta por filitas, cuarcitas, rocas volcánicas verdosas y calizas marmolizadas, que contienen vetas mineralizadas con diversos metales. Su espesor alcanza hasta 1800 metros en la región de Tarma.

- **Pérmico (grupo Mitu):** caracterizada por una sucesión volcánica de rocas andesíticas y dacíticas, acompañadas de brechas, aglomerados y tufos, con un espesor estimado de 800 metros.

- **Triásico superior-liásico (grupo Pucará):** conformada por tres formaciones calcáreas que incluyen calizas, dolomitas, pizarras, areniscas y chert.

- **Cretácico inferior (grupo Goyllarisquizga):** presenta depósitos de pelitas rojas finas, areniscas gruesas y conglomerados, con un espesor aproximado de 100 metros.

- **Cretácico medio (grupo Machay):** contiene calizas, margas y carbonatos dolomíticos, con espesores variables y la presencia de amonites como fósiles característicos.

2.2.4 Geología estructural

La mina San Cristóbal se encuentra en el flanco occidental del domo de Yauli, que tiene una extensión de 35 km en dirección norte-sur y 10 km en dirección este-oeste, con una orientación hacia N 40° O. El domo presenta inclinaciones variables, de 30° a 40° en el flanco este y de 60° a 80° en el flanco oeste. Entre las estructuras destacadas están los anticlinales Chumpe y Yauli, siendo el de Chumpe el más significativo, con un buzamiento de 55° hacia el suroeste. El sistema de fracturamiento en la mina Carahuacra está relacionado con las fuerzas compresivas del domo de Yauli, que iniciaron la formación del anticlinal de Chumpe en el Cretácico. Durante el plegamiento Incaico, las calizas se deslizaron sobre rocas volcánicas, y tras el plegamiento Quechua, la región experimentó mineralización, formando vetas, mantos y cuerpos minerales. Las vetas se formaron por el relleno de fracturas, los mantos en el flanco occidental del anticlinal y los cuerpos minerales por la intersección de vetas y mantos (6).

2.2.5 Geología económica

Tras la fase de plegamiento Quechua y la generación de fracturas de tensión, la región atravesó un periodo de mineralización. Las soluciones mineralizantes residuales, posiblemente originadas de stocks de monzonita cuarcífera, dieron lugar a la formación de vetas, mantos y cuerpos minerales:

- **Vetas:** se originaron por el relleno de fracturas mineralizadas, principalmente en fracturas de tensión. Estas estructuras se distribuyen ampliamente en el distrito minero, con mayor presencia en los volcanes del grupo Mitú. Las fallas de cizalla, aunque están asociadas con mineralización, presentan un aporte limitado debido a la fragmentación de los materiales en dichas zonas.

- **Mantos:** ubicados en el flanco occidental del anticlinal, dentro de las calizas del grupo Pucará, se desarrollan en contacto con las rocas volcánicas del grupo Mitú, siguiendo la estratificación natural de las formaciones rocosas.

- **Cuerpos:** también situados en el flanco oeste del anticlinal, dentro de las calizas del grupo Pucará, estos se generan por la intersección de vetas con mantos o la combinación de múltiples mantos mineralizados.

2.3. Bases teóricas

2.3.1 Técnicas de control en perforación del Sub Nivel 75-2 Este, Unidad Minera San Cristóbal

La evaluación de las condiciones actuales permite diagnosticar el estado del macizo rocoso, herramientas y parámetros operativos, identificando factores críticos que afectan la eficiencia. El replanteo de los parámetros de perforación optimiza variables como la profundidad, diámetro, velocidad de rotación y presión para mejorar la precisión y reducir costos. Paralelamente, el replanteo de los parámetros de voladura rediseña mallas, selecciona explosivos adecuados y ajusta retardos para maximizar la fragmentación y minimizar la sobrerotura. A través del monitoreo y control de la voladura, se supervisa la ejecución y se analizan indicadores como vibraciones y granulometría, asegurando cumplimiento con el diseño. Finalmente, se evalúan los costos y la eficiencia operativa mediante el análisis de gastos directos y la productividad, buscando un avance lineal óptimo con el menor impacto económico y ambiental. En la siguiente figura se muestra la metodología de la perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

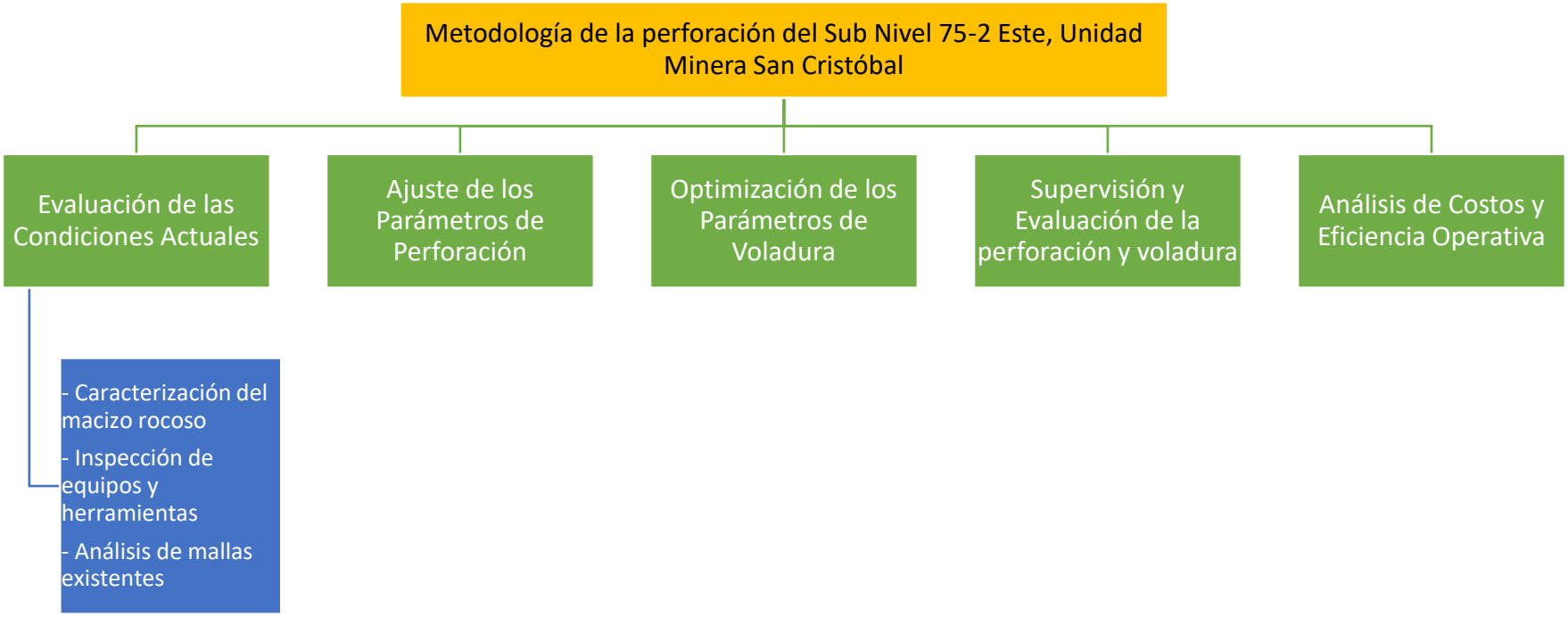


Figura 4. Metodología de la perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal
***Tomada del Departamento de operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal* (7)**

En la siguiente sección se detalla la metodología de la perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal, Unidad Minera San Cristóbal.

2.3.1.1.Evaluación de las condiciones actuales

La evaluación de las condiciones actuales es un diagnóstico integral que permite identificar áreas críticas para optimizar el proceso de perforación y voladura. Incluye la caracterización del macizo rocoso mediante sistemas como RMR y Q-System, análisis de fracturamiento y dureza de la roca, inspección del estado y rendimiento de herramientas como barras, brocas y martillos, y revisión de las mallas existentes para evaluar la disposición de barrenos y la eficiencia de la fragmentación obtenida. Además, se consideran indicadores clave como el costo por metro perforado y el tiempo promedio por barreno, proporcionando una base sólida para ajustes técnicos y mejoras operativas.

- **Inspección del macizo rocoso**

  Caracterización geomecánica utilizando RMR o Q-System.

  Evaluación de la dureza, abrasividad y fracturación del macizo.

En la siguiente tabla se muestra la inspección del macizo rocoso (clasificación RMR)

Tabla 3. ***Inspección del macizo rocoso (Clasificación RMR)***

Parámetro	Rango de Evaluación	Descripción	Puntaje (RMR)
Resistencia de la roca intacta	≤ 1 MPa a > 250 MPa	Resistencia de la roca medida por ensayos de compresión uniaxial.	1 a 15
RQD (Rock Quality Designation)	0 % a 100 %	Índice que mide la proporción de roca de calidad en el núcleo de perforación.	3 a 20
Separación de discontinuidades	< 5 mm a > 2 m	Distancia entre planos de fractura principales en el macizo rocoso.	5 a 20
Condición de las discontinuidades	Muy pobre a excelente	Evaluación de rugosidad, relleno y apertura de las fracturas.	0 a 30
Condiciones de agua subterránea	Seco a presión significativa	Presencia de agua en el macizo y su efecto en la estabilidad.	0 a 15

Tomada del Departamento de Geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (8)

Tabla 4. ***Clasificación final (suma total de puntos)***

Rango de RMR	Calidad del macizo rocoso	Descripción
81 - 100	Muy Bueno	Requiere poco o ningún sostenimiento.
61 - 80	Bueno	Generalmente estable, sostenimiento mínimo.
41 - 60	Regular	Requiere soporte adicional.
21 - 40	Malo	Inestable, se necesita sostenimiento intensivo.
< 20	Muy Malo	Altamente inestable, riesgo crítico.

Tomada del Departamento de Geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (8)

Esta tabla detalla los parámetros evaluados según el sistema RMR, proporcionando una herramienta para clasificar la calidad del macizo y diseñar estrategias adecuadas de perforación, voladura y sostenimiento.

1 Evaluación del equipo y herramientas

La evaluación del Boomer S1D y sus herramientas asociadas (broca de 51 mm, barra de 12 pies y rimadora de 102 mm) es un proceso clave para garantizar la eficiencia operativa y la optimización de costos en la perforación subterránea. Esta evaluación se realiza bajo los siguientes criterios:

- **Boomer S1D**

✓ Objetivo: verificar la funcionalidad y eficiencia del equipo.
✓ Sistema hidráulico: inspección de fugas, presión, y caudal dentro de los rangos recomendados.
✓ Sistema eléctrico: revisión de conexiones, continuidad, y detección de fallos.
✓ Sistema de perforación: evaluación del torque, impacto, y velocidad de avance.
✓ Posicionamiento: alineación y movilidad suave del brazo perforador.
✓ Horas acumuladas: identificar mantenimientos programados según ciclos de uso.

- **Broca de 51 mm**

✓ Objetivo: garantizar el rendimiento y reducir costos de desgaste.
✓ Condición de los insertos: inspección visual para identificar desgaste o fracturas.
✓ Rendimiento: evaluar el tiempo por barreno y la cantidad de perforaciones realizadas.
✓ Vida útil: metros perforados.

- **Barra de 12 pies**

✓ Objetivo: asegurar alineación y resistencia.

- ✓ Rectitud: verificación de desviaciones con medición directa.
- ✓ Estado de las roscas: inspección para identificar desgastes, fisuras o deformaciones.
- ✓ Resistencia: pruebas en operación para determinar la estabilidad bajo impacto.
- ✓ Vida útil: metros perforados

- **Rimadora de 102 mm**

- ✓ Objetivo: validar la calidad del rimado y la durabilidad de los cortadores.
- ✓ Alineación: revisión de brazos para evitar irregularidades en el rimado.
- ✓ Desgaste de cortadores: medición de los insertos y registro del porcentaje de desgaste.
- ✓ Rendimiento: tiempo promedio por rimado y calidad del resultado.
- ✓ Vida útil: metros perforados

2 Análisis de mallas existentes

El diseño de malla subterránea es una herramienta clave para optimizar la perforación y voladura, basada en la distribución de barrenos y el uso eficiente de explosivos. Este proceso utiliza parámetros fundamentales como el burden (B), espaciamiento (S) y la profundidad de los barrenos (P), con el objetivo de maximizar la fragmentación, minimizar la sobre rotura y reducir costos operativos (7).

Tabla 5. ***Análisis de mallas existentes***

Parámetro	Fórmula/ Definición	Valores actuales	Valores óptimos propuestos	Justificación/ Observaciones
Burden (B)	$x = \mathrm{k} \cdot \sqrt{D \cdot E}$	2.5 m	2.2 m	Ajustado para reducir sobrerotura y mejorar la energía transferida.
Espaciamiento (S)	S=1.15·B	2.0 m	1.8 m	Mejora la distribución uniforme de energía entre barrenos.
Factor de carga (q)	q= C/B·S	2.0 kg/m²	1.8 kg/m²	Optimización del uso de explosivos para equilibrar costos y resultados.
Densidad de energía (E)	Depende del explosivo utilizado	3.4 MJ/kg	3.8 MJ/kg	Uso de emulsión bombeable mejora la eficiencia energética.
Diámetro d barreno (D)	Tamaño estándar utilizado	51 mm	51 mm	Mantiene compatibilidad con herramientas existentes.
Relación B/D	B/D	49	43	Mejora el control de voladura, menor sobrerotura y mayor eficiencia.
Profundidad d barreno (P)	Según diseño y altura del subnivel	3.5 m	3.3 m	Reducción para minimizar sobre perforación y optimizar costos.

Retardos entr barrenos (trt_rtr)	Basado en simulaciones y pruebas	25 ms	30 ms	Ajuste para evitar interferencias y mejorar la liberación de energía.
Fragmentación (P80)	Relación entre diseño de malla y propiedades del macizo	30 cm	20 cm	Diseño ajustado para obtener granulometría adecuada al acarreo.
Sobrerotura (%)	Inspección posvoladura	12%	5%	Menor burden y mejor control de carga reducen daños en hastiales.

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

2.3.1.2.Ajuste de los parámetros de perforación

El ajuste de los parámetros de perforación es esencial para maximizar la eficiencia y minimizar el desgaste de herramientas, optimizando el rendimiento del equipo y asegurando una perforación precisa en el macizo rocoso. A continuación, se presentan los rangos de ajuste recomendados para parámetros operativos clave:

Tabla 6. ***Análisis de mallas existentes***

Parámetro	Rango recomendado	Descripción
Rotación	40 - 50 bar	Presión óptima para evitar desviaciones y mantener la alineación del barreno.
Percusión	140 - 180 bar	Impacto controlado para maximizar la eficiencia en rocas de dureza media-alta.
Avance	60 - 90 bar	Presión adecuada para equipos frontoneros, asegurando un avance uniforme.
Anti atasque	75 bar	Establecido 25 bar por encima de la presión de rotación para liberar bloqueos.
Velocidad de Rotación (RPM)	180 rpm (general), 135 rpm (brocas de 89-102 mm)	Ajustada según el diámetro de la broca para evitar desgaste prematuro.

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

- **Justificación de los ajustes**

✓ Rotación y percusión: estos parámetros trabajan en conjunto para equilibrar velocidad y fuerza. Rangos superiores pueden causar fracturas no deseadas o desviaciones.

✓ Avance: un avance controlado evita el riesgo de sobrecarga en las barras, prolongando su vida útil.

✓ Anti atasque: este ajuste automático protege las herramientas ante bloqueos en zonas fracturadas o abrasivas.

✓ RPM: las brocas más grandes requieren menor velocidad para reducir el calor y el desgaste, garantizando perforaciones precisas.

- **Resultados esperados**

✓ Menor desgaste en barras y brocas.
✓ Incremento en la precisión del patrón de perforación.
✓ Reducción de costos operativos y mayor avance lineal por turno.

2.3.1.3.Optimización de los parámetros de voladura

Para la optimización de los parámetros de voladura en relación con el factor de carga y la potencia de las voladuras, se puede estructurar una tabla detallada que considere estos factores clave para ajustar los parámetros y mejorar la eficiencia y los resultados de la voladura. Aquí tienes un ejemplo de cómo organizar la información.

Tabla 7. ***Optimización de los parámetros de voladura***

Parámetro	Descripción	Valor promedio	Comentarios/Acciones de Mejora
Factor de carga (F.C.)	Relación entre la carga de explosivo y el volumen de roca a fracturar.	0.8 kg/m³	Reducir el factor de carga para mejorar la fragmentación y reducir costos.
Potencia del explosivo (E)	Medida de la energía liberada por el explosivo en la voladura.	4000 kJ/kg	Usar explosivos con mayor potencia para optimizar la eficiencia en la fractura.
Carga por agujero	Cantidad de explosivo utilizado por agujero (kg).	10 kg	Reducir la carga para mejorar la distribución de energía y evitar sobre rotura.
Espaciado de perforación	Distancia entre agujeros de perforación (m).	3.0 m	Reducir el espaciado para aumentar la eficiencia de la voladura.
Diámetro de perforación	Diámetro de los agujeros de perforación (mm).	90 mm	Incrementar el diámetro de perforación para optimizar la distribución de la carga explosiva.
Longitud de la perforación	Longitud de los agujeros de perforación (m).	12 m	Reducir la longitud para evitar perforaciones innecesarias y mejorar la precisión de la voladura.

Velocidad de detonación	Velocidad a la que se produce la detonación (m/s).	3000 m/s	Aumentar la velocidad de detonación para generar una mejor expansión de los gases.
Retardos de detonación	Intervalo de tiempo entre detonaciones sucesivas (ms).	25 m	Incrementar el intervalo de retardos para mejorar el control de la energía y evitar los efectos de onda de choque.
Energía total por agujero	Energía liberada por cada agujero de perforación (J).	50,000 J	Aumentar la energía total de cada agujero mediante la optimización de la carga y el tipo de explosivo.
Coeficiente de potencia	Relación entre la potencia del explosivo y la densidad de la roca.	0.5 $kg/m^3/kJ$	Ajustar el coeficiente para equilibrar la potencia y la resistencia de la roca.
Fragmentación final	Tamaño promedio de los fragmentos generados (cm).	20 cm	Optimizar la voladura para conseguir una fragmentación más fina, reduciendo el costo de transporte y procesamiento.
Consumo de explosivo	Consumo total de explosivo por unidad de material fragmentado (kg/t).	0.25 kg/t	Reducir el consumo sin afectar la eficacia de la voladura.

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

Esta tabla puede adaptarse a las características específicas de la mina y sus condiciones geomecánicas. La optimización de los factores de carga y potencia permite reducir costos operativos, mejorar la fragmentación y aumentar la seguridad en la voladura.

2.3.1.4.Supervisión y evaluación de la perforación y voladura

La supervisión y evaluación de la perforación y voladura subterránea se centran en garantizar que las operaciones de perforación y voladura en ambientes subterráneos sean seguras, eficientes y eficaces. Estas actividades deben controlar factores como la seguridad, la productividad y la fragmentación del material. A continuación, te presento una tabla detallada que incluye los aspectos clave de supervisión y evaluación en minería subterránea.

Tabla 8. ***Supervisión y evaluación de la perforación y voladura***

Aspecto	Descripción	Método de Supervisión /Evaluación	Frecuencia	Acciones correctivas
Control de perforación	Verificación de la calidad y exactitud de la perforación (diámetro, profundidad, alineación).	Inspección visual, control de datos mediante sistemas electrónicos, medición con láser o calibración.	Diaria, por cada turno de perforación.	Ajustar los parámetros de perforación, como el ángulo y la profundidad.
Condiciones de la roca	Evaluación de la geomecánica del macizo rocoso para ajustar los parámetros de perforación y voladura.	Pruebas geomecánicas, análisis RMR (Rock Mass Rating), observación de la estabilidad de la roca durante y después de la perforación.	Mensual o cada cambio significativo en el terreno.	Ajustar los parámetros de voladura según los resultados geomecánicos.
Control de carga de explosivo	Verificación de la cantidad de explosivo utilizada en cada agujero.	Comparación de la carga nominal vs. la carga efectiva, medición directa en cada agujero.	Antes de cada voladura.	Ajustar la carga de explosivo si se detecta una discrepancia.
Condiciones de seguridad	Verificación de las medidas de seguridad durante las actividades de perforación y voladura.	Inspección de equipos de protección personal (EPP), control de ventilación, y revisión de procedimientos de seguridad.	Diaria	Reforzar las medidas de seguridad, realizar capacitaciones y corregir deficiencias.
Tiempo de detonación	Control del tiempo de retraso entre detonaciones en la voladura.	Uso de sistemas de control electrónico de detonadores, verificación de los retardos.	Por cada voladura.	Ajustar los tiempos de retraso para evitar efectos negativos en la fragmentación o seguridad.
Evaluación c	Verificación del	Inspección visual,	Después	Ajustar los

la fragmentación	tamaño de los fragmentos generados por la voladura.	análisis de tamaño de fragmentos, muestreo y cribado.	de cada voladura.	parámetros de la voladura para obtener una fragmentación más eficiente.
Monitoreo de vibraciones	Medición de las vibraciones generadas durante las voladuras subterráneas para evitar daños estructurales.	Uso de acelerómetros, monitoreo sísmico, medición de desplazamientos.	Después de cada voladura.	Ajustar los parámetros de voladura, como la carga explosiva y el espaciamiento.
Impacto en el sostenimiento	Evaluación de los efectos de la voladura sobre el sostenimiento subterráneo (hastiales, techos, y paredes).	Inspección de la estabilidad de las estructuras de sostenimiento, monitoreo de desplazamientos.	Después de cada voladura.	Reajustar la carga de explosivos y la técnica de voladura para reducir daños.
Rendimiento de los equipos de perforación	Evaluación de la eficiencia de los equipos de perforación (avance por hora, tiempo de inactividad).	Monitoreo de tiempos de perforación, registros de fallas y mantenimiento de equipos.	Diaria	Implementar mantenimiento preventivo y mejorar la gestión de los tiempos de operación.
Costos de voladura	Evaluación del costo total de las voladuras (explosivo, perforación, sostenimiento, etc.).	Análisis de costos comparativos, revisión de consumo de explosivos y materiales.	Mensual o por campaña de voladura	Optimizar el uso de explosivos y mejorar la eficiencia operativa.

Eficiencia de la voladura	Evaluación de la efectividad de la voladura en relación con los objetivos de avance y fragmentación.	Análisis de resultados post voladura (avance, fragmentación, costos operativos).	Después de cada voladura	Ajustar los parámetros de voladura y perforación para optimizar la eficiencia.

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

- **Indicadores clave para evaluación subterránea:**

✓ Estabilidad del macizo rocoso: evaluar la seguridad y estabilidad del terreno tras la perforación y voladura.

✓ Fragmentación del material: analizar el tamaño y la distribución de los fragmentos para evaluar la eficiencia de la voladura.

✓ Seguridad y cumplimiento de normas: monitorear el cumplimiento de las normativas de seguridad, especialmente en un entorno subterráneo.

✓ Avance de la perforación: medir el rendimiento de los equipos de perforación, la cantidad de material perforado y el tiempo de avance.

✓ Impacto en la infraestructura: controlar las vibraciones y desplazamientos para evitar daños a la infraestructura subterránea.

✓ Consumo de explosivos: evaluar el uso de explosivos por tonelada de material fragmentado para optimizar los costos.

Este enfoque de supervisión y evaluación ayudará a mantener el control sobre las operaciones de perforación y voladura subterránea, mejorando la seguridad, la eficiencia y la productividad en la minería.

2.3.1.5.Análisis de costos y eficiencia operativa

El análisis de costos y eficiencia operativa en perforación, voladura, materiales, herramientas, EPPs y equipos Boomer en minería subterránea se centra en evaluar cada uno de estos aspectos para mejorar la rentabilidad, la seguridad y la eficiencia de las operaciones. A continuación, te proporciono una tabla detallada para el análisis de costos y eficiencia operativa en estos puntos específicos:

Análisis de costos y eficiencia operativa en perforación, voladura, materiales, herramientas, EPPs y equipos Boomer en minería subterránea (subnivel)

Tabla 9. ***Análisis de costos y eficiencia operativa***

Aspecto	Descripción	Método de evaluación	Frecuencia	Acciones correctivas
Costo de perforación	Evaluación de los costos asociados a la perforación (equipos, tiempo, mano de obra y consumibles).	Análisis de costos por metro perforado, consumo de energía y desgastes de herramientas.	Diario o por campaña de perforación.	Optimizar el tiempo de perforación, reducir el desgaste de brocas y aumentar la eficiencia de los equipos.
Costo de voladura	Costos asociados con explosivos, accesorios, mano de obra y transporte de material fragmentado.	Análisis de costos por tonelada movida, cantidad de explosivos usados y costos de mano de obra.	Después de cada voladura.	Optimizar la dosificación de explosivos, mejorar la selección de accesorios y reducir los costos asociados.
Costo de materiales (explosivos)	Evaluación de los costos de los materiales y explosivos utilizados en cada voladura.	Análisis de consumo de explosivos y comparativa de costos por tonelada de material fragmentado.	Después de cada voladura.	Cambiar el tipo de explosivo, optimizar la cantidad usada y evaluar su eficiencia.
Costo de herramientas (brocas, barras)	Evaluación de los costos de las herramientas utilizadas en perforación, incluyendo su desgaste y reposición.	Registro del desgaste de herramientas, tiempo de operación, y costo de reposición.	Mensual o al realizar reemplazo.	Optimizar el tipo de herramienta y la selección para reducir el desgaste y costo de reposición.

Costo de EPPs (equipos de protección personal)	Costos asociados con la compra, mantenimiento y reposición de EPPs para la seguridad de los trabajadores subterráneos.	Análisis del costo de EPPs por trabajador y por turno de trabajo, frecuencia de reposición.	Anual o por campaña de seguridad.	Optimizar la compra de EPPs, evaluar la durabilidad de los productos y mejorar los protocolos de seguridad.
Costo de equipos Boomer	Costos asociados al uso y mantenimiento de equipos Boomer (perforadoras de cara).	Análisis de costos por metro perforado, tiempos de inactividad, y mantenimiento de equipos.	Diario o por turno de operación.	Implementar mantenimiento preventivo, mejorar la eficiencia de operación y reducir los tiempos muertos.
Tiempo de ciclo operativo (perforación, voladura y transporte)	Medición del tiempo total desde la perforación hasta la voladura y transporte del material.	Análisis de tiempos de ciclo para perforación, voladura, y carga/transporte.	Diaria o por turno de operación.	Reducir tiempos muertos, mejorar la logística y la coordinación entre operaciones.
Eficiencia en la fragmentación	Evaluación de la efectividad de la voladura para obtener fragmentos de tamaño adecuado que faciliten el manejo posterior.	Medición del tamaño de fragmentos, análisis de la distribución de tamaños y costos asociados a su manipulación.	Después de cada voladura.	Ajustar los parámetros de voladura para obtener una fragmentación más eficiente.

Costo de mantenimiento de equipos (Boomer y herramientas)	Costos relacionados con el mantenimiento preventivo y correctivo de equipos Boomer y herramientas de perforación.	Registro de costos de mantenimiento, tiempo de inactividad y frecuencia de reparaciones.	Mensual o por mantenimiento.	Implementar un programa de mantenimiento preventivo y reducir los tiempos de inactividad.
Consumo de combustible	Evaluación de los costos asociados al consumo de combustible por parte de los equipos Boomer y vehículos de transporte.	Análisis de litros de combustible por metro perforado, tonelada transportada, o equipo operado.	Diaria o semanal.	Mejorar la eficiencia energética de los equipos, reducir el consumo de combustible.
Costo de mano de obra	Evaluación de los costos laborales asociados con las actividades de perforación, voladura y manejo de equipo.	Análisis de los costos por hora trabajada, productividad por operario y evaluación de horas extras.	Mensual	Mejorar la productividad del personal, optimizar los turnos de trabajo y reducir horas extras.
Rendimiento del equipo Boomer	Evaluación del rendimiento de las perforadoras Boomer en términos de avance por hora y utilización de la máquina.	Monitoreo de las horas operativas de la máquina y la cantidad de metros perforados por hora.	Diaria o por campaña.	Mejorar el uso de los equipos, realizar mantenimiento preventivo y reducir tiempos muertos.

	Costos asociados con la reposición de piezas de desgaste en los equipos Boomer y herramientas de perforación.	Registro de piezas reemplazadas, costo de cada repuesto y frecuencia de reposición.	Mensual o por campaña	Evaluar el rendimiento de las piezas, elegir repuestos más duraderos y reducir la frecuencia de reposición.

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

- **Indicadores clave para evaluación:**

✓ Costo por metro perforado: relación entre el costo total de perforación y la cantidad de material perforado.

✓ Eficiencia de fragmentación: comparación del tamaño de los fragmentos con los objetivos de voladura, optimizando los costos de carga y transporte.

✓ Tiempo de ciclo de operación: análisis del tiempo total para completar un ciclo de perforación, voladura y carga.

✓ Rendimiento del equipo Boomer: medición de la productividad de los equipos Boomer en términos de avance por hora o metro perforado.

✓ Costo por tonelada de material transportado: relación entre el costo total de transporte y la cantidad de material transportado.

✓ Costo de mantenimiento: relación entre el costo de mantenimiento y la vida útil de los equipos Boomer y las herramientas de perforación.

✓ Eficiencia de los EPPs: evaluación de la durabilidad y la efectividad de los equipos de protección personal frente a la seguridad operativa.

- **Acciones para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos:**

✓ Optimización de parámetros de perforación y voladura: ajustar los parámetros de perforación y voladura para obtener una mejor fragmentación y reducir los costos asociados al manejo del material.

✓ Mantenimiento preventivo de equipos Boomer: implementar programas de mantenimiento preventivo para evitar fallas imprevistas y reducir los tiempos de inactividad.

✓ Selección adecuada de herramientas: evaluar el tipo de brocas y herramientas según el tipo de roca y las condiciones operativas para reducir su desgaste y costos de reposición.

✓ Capacitación del personal: aumentar la capacitación del personal para mejorar la eficiencia en el uso de los equipos y la seguridad.

- ✓ Mejorar la logística de transporte: optimizar las rutas de transporte para reducir los tiempos y costos asociados al movimiento del material.
- ✓ Optimización del consumo de combustible: mejorar la eficiencia energética mediante el uso de equipos más eficientes y la optimización de las operaciones.

Este análisis permite identificar áreas de mejora y optimización en las operaciones subterráneas, ayudando a reducir los costos operativos y a incrementar la eficiencia en cada uno de los procesos involucrados en la minería subterránea.

CAPÍTULO III
MÉTODOLOGÍA

3.1 Método y alcances de la investigación

3.1.1 Métodos de la investigación

a) Método general

Se utilizó el método científico. Se usa para investigar y aplicar técnicas de control en perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

b) Método específico

Se utilizó el método experimental inductivo-deductivo. Este enfoque combina la observación de datos empíricos (inductivo) y la aplicación de teorías preexistentes (deductivo) para implementar técnicas de control en perforación, con el fin de reducir el costo por metro lineal en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

3.2 Alcances de la investigación

a) Tipo de investigación

Es aplicativa. El objetivo es implementar técnicas de control en perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

b) Nivel de investigación

Es descriptivo. Se enfoca en describir las técnicas de control en perforación aplicadas en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal, para optimizar los costos operativos.

3.3 Diseño de la investigación

Es experimental. La investigación se basa en la aplicación práctica de técnicas experimentales para controlar y reducir el costo por metro lineal en el proceso de perforación en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

3.4 Población y muestra

3.3.1 Población

Todos los subniveles de la Zona II de la Unidad Minera San Cristóbal.

3.3.2 Muestra

El Subnivel 75-2 este de la Zona II de la Unidad Minera San Cristóbal.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnicas utilizadas en la recolección de datos

Observación: se realizará la recolección de datos en campo, mediante la técnica observacional y procesamiento de datos actuales de la perforación del Subnivel 75-2 este de la Zona II de la Unidad Minera San Cristóbal.

Para la investigación se utilizará como instrumento de campo: cuaderno de notas, planos, vernier, flexómetro, y herramientas de gestión de la Unidad Minera San Cristóbal.

Recopilación: recolección de datos de la perforación, factores y parámetros, control de uso y consumo, utilizando programa Excel, y hacer uso de tesis, libros y laptop para el procesamiento de los datos.

3.4.2 Instrumentos utilizados en la recolección de datos

- Informes
- Publicaciones
- Tesis
- Planos
- Fichas
- Libros
- Internet
- PC

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1Desarrollar las técnicas de control en perforación para disminuir el costos por metro lineal del Sub Nivel 75-2 Este, Unidad Minera San Cristóbal

La metodología de perforación en el Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal se enfoca en una evaluación detallada de las condiciones actuales para identificar áreas de mejora. Esto incluye la caracterización del macizo rocoso, la inspección de los equipos y herramientas de perforación y un análisis de las mallas de perforación existentes. A partir de esta evaluación, se procede al ajuste de los parámetros de perforación, asegurando una mayor eficiencia y reducción de costos. La optimización de los parámetros de voladura juega un papel clave en la mejora de la fragmentación del material y el control de la sobrerotura. Además, se implementa un sistema de supervisión y evaluación constante de las perforaciones y voladuras, con el fin de monitorear el desempeño y realizar ajustes en tiempo real. Finalmente, se realiza un análisis de los costos y la eficiencia operativa para evaluar el impacto de las mejoras implementadas y garantizar la rentabilidad de las operaciones.

En la siguiente figura se detalla la metodología de la perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

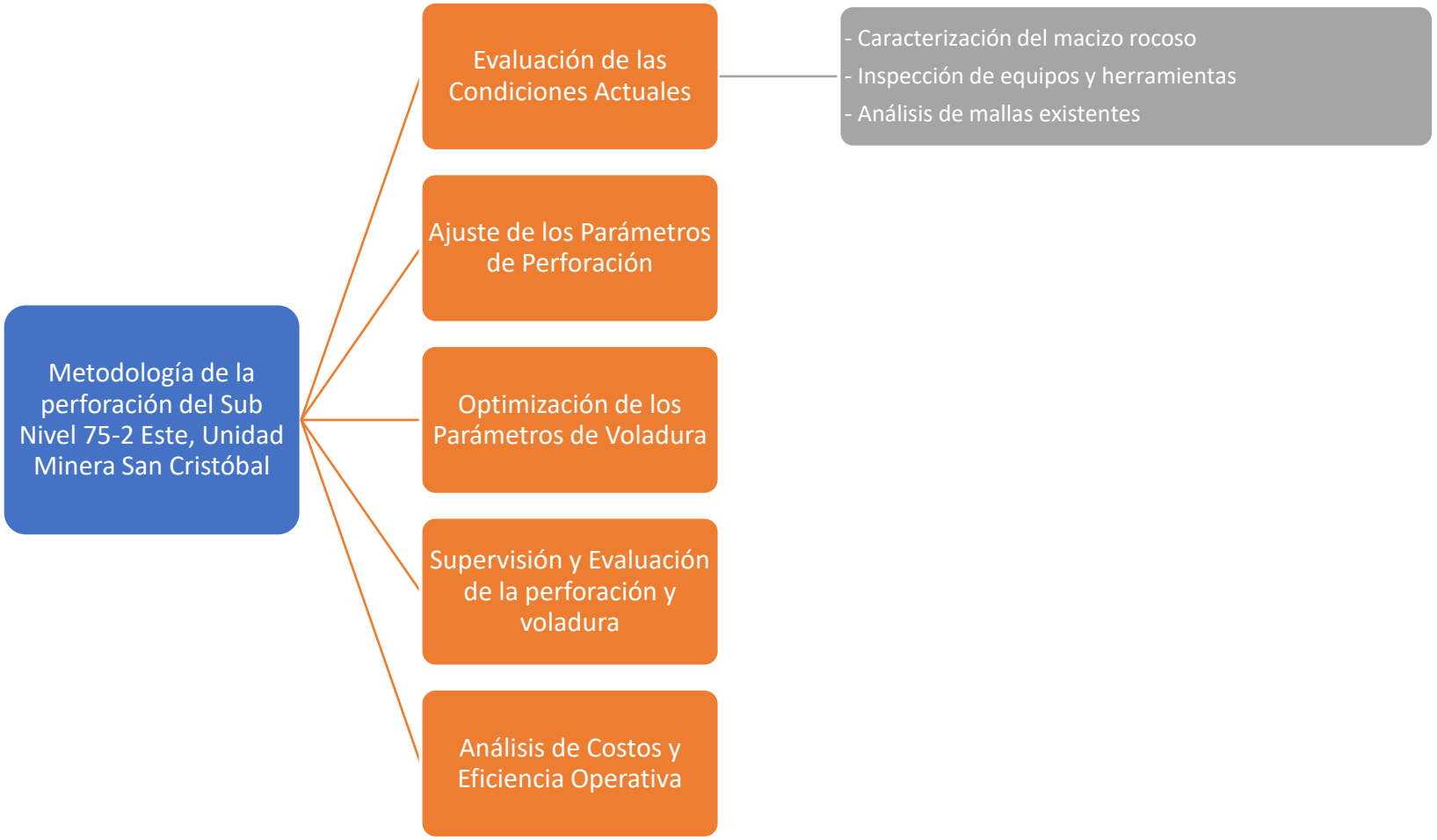


Figura 5. Metodología de la perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

4.1.1 Evaluación de las condiciones actuales Sub Nivel 75-2 Este

a) Evaluación de las condiciones actuales

La evaluación de las condiciones actuales mediante el mapeo geomecánico en el Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal se realizó con el propósito de caracterizar el macizo rocoso y optimizar los procesos de perforación y voladura. Este mapeo incluyó la determinación de parámetros clave como la resistencia de la roca intacta mediante ensayos de compresión uniaxial, el índice de calidad de roca (RQD) a partir del análisis de núcleos de perforación, y la separación, condición y orientación de las discontinuidades principales mediante observaciones in situ. Además, se evaluaron las condiciones de agua subterránea y su influencia en la estabilidad del macizo. Los datos obtenidos permitieron zonificar el macizo en función de su calidad geomecánica utilizando la clasificación RMR, identificando áreas críticas que requieren ajustes en los diseños de perforación, voladura y sostenimiento. Este análisis proporciona una base técnica para mejorar la eficiencia operativa y garantizar la seguridad en el Sub Nivel.

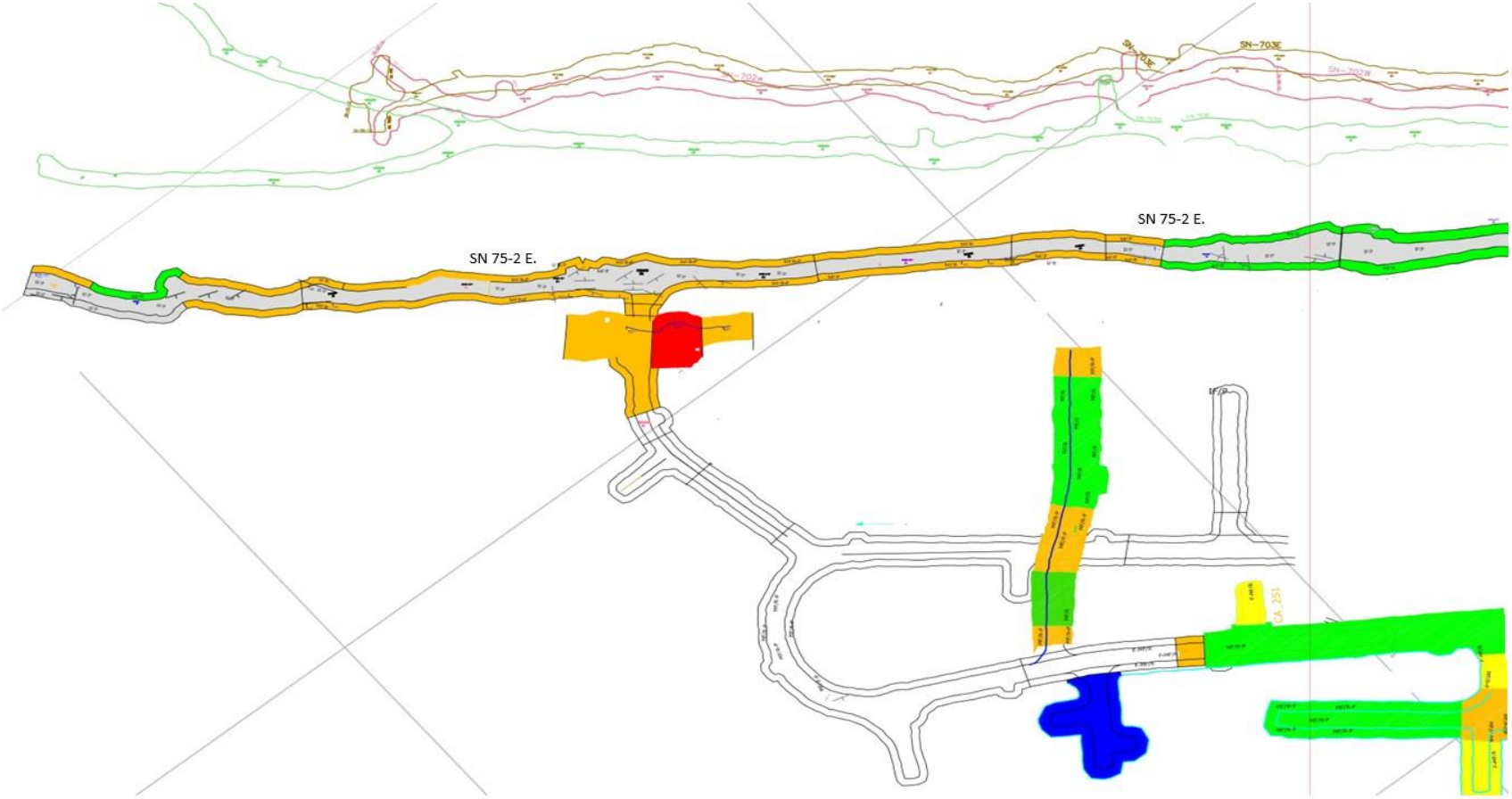


Figura 6. Mapeo geomecánico del Sub Nivel 75-2 Este de la Unidad Minera San Cristóbal
Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal *(7)*

b) Ajuste de los parámetros de perforación

Selección y modificación de parámetros como el diámetro de broca, profundidad de los barrenos, ángulo y patrón de perforación, de acuerdo con las condiciones del terreno.

Tabla 10. ***Parámetros clave de la perforación y del equipo del Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal***

Parámetros clave de la perforación	
Categoría / Parámetro	Valores / Consideraciones.
Diámetro de los barrenos	Evaluar según el tipo de roca y los objetivos de fragmentación.
Espaciamiento y burden	Ajustar para mejorar la fragmentación del material.
Profundidad de los barrenos	Verificar para evitar sobre perforación innecesaria.
Angulación de los barrenos	Modificar para optimizar la fragmentación en zonas críticas.
Parámetros clave del equipo	
Categoría / Parámetro	Valores / Consideraciones.
Rotación	40 - 50 bar
Percusión	140 - 180 bar
Avance (equipos frontoneros)	60 - 90 bar
Avance (taladros)	25 - 45 bar
Anti atasque	75 bar
Velocidades de rotación	125 - 180 RPM, dependiendo del diámetro de la broca.

Esta tabla combina aspectos operativos de perforación y especificaciones técnicas del equipo para optimizar el proceso de perforación según las condiciones de la roca y las capacidades de los equipos.

c) Optimización de los parámetros de voladura

Ajuste de cargas explosivas, tiempos de retardo y secuencias de disparo para garantizar una fragmentación adecuada, minimizar la sobrerotura y maximizar la eficiencia del avance.

Tabla 11. ***Parámetros voladura del Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal***

Aspecto	Descripción	Puntos clave
Accesorios y explosivos	Selección adecuada para maximizar seguridad y eficacia.	- Explosivos: EMULEX (45%, 65%, 80%) y Emulnor (1000 y 3000). - Accesorios: guías de seguridad, exsaneles, mecha rápida, cordón detonante, Fanel LP, Carmex 7 pies.
Control de sobrerotura	Técnicas para evitar daños y mejorar fragmentación.	- Diseño con software especializado para secuencias precisas. - Selección de explosivos según geomecánica del macizo. - Ajuste de retardos para uniformidad. - Simulaciones predictivas.
Secuencia del proceso	Etapas clave para optimizar la operación.	- Evaluación inicial con mapeo geomecánico. - Diseño de voladura ajustado a condiciones del terreno. - Control operativo con inspección visual y análisis de fragmentación.

Este resumen destaca los elementos esenciales del proceso de voladura, garantizando eficiencia, fragmentación uniforme y estabilidad estructural en las excavaciones.

d) Supervisión y evaluación de la perforación y voladura

Monitoreo constante de las operaciones para validar el cumplimiento de los parámetros establecidos y detectar desviaciones.

Realización de pruebas de campo para evaluar la calidad de la fragmentación y el desempeño operativo.

Tabla 12. ***Supervisión y evaluación de la perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este – Unidad Minera San Cristóbal***

Aspecto	Método de Supervisión/Evaluación	Frecuencia	Acciones correctivas
Control de perforación	Inspección visual, medición con láser, control de datos electrónicos.	Diaria, por turno de perforación	Ajustar parámetros de perforación (ángulo, profundidad).
Condiciones de la roca	Pruebas geomecánicas, análisis RMR, observación de estabilidad.	Mensual o tras cambios significativos	Modificar parámetros según análisis geomecánico.
Control de carga explosiva	Comparación de carga nominal vs. efectiva, medición directa.	Antes de cada voladura	Corregir discrepancias en carga explosiva.
Condiciones de seguridad	Inspección de EPP, ventilación, revisión de procedimientos.	Diario	Reforzar medidas, capacitar personal.
Tiempo de detonación	Uso de sistemas electrónicos, verificación de retardos.	Por cada voladura	Ajustar tiempos para evitar fragmentación deficiente.
Evaluación de fragmentación	Inspección visual, análisis de tamaño, cribado.	Después de cada voladura	Optimizar parámetros para mejorar fragmentación.
Monitoreo de vibraciones	Uso de acelerómetros, monitoreo sísmico.	Después de cada voladura	Ajustar carga y espaciamiento explosivo.
Impacto en el sostenimiento	Inspección de estabilidad, monitoreo de desplazamientos.	Después de cada voladura	Reajustar técnica de voladura y carga de explosivos.
Rendimiento de equipos	Monitoreo de tiempos, registros de fallas, mantenimiento preventivo.	Diaria	Mejorar gestión operativa, realizar mantenimientos.
Costos de voladura	Análisis de costos, revisión de consumo de materiales.	Mensual o por campaña	Optimizar uso de explosivos, aumentar eficiencia.
Eficiencia de voladura	Análisis de avances, fragmentación, costos.	Después de cada voladura	Ajustar perforación y voladura para mayor eficiencia.

Fuente: Departamento de operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

Este enfoque estructurado permitirá gestionar de manera eficiente las operaciones en el Subnivel 75-2 este, asegurando una mejor relación entre productividad, seguridad y costos.

e) Análisis de costos y eficiencia operativa

Cálculo de costos por metro lineal perforado y tonelada fragmentada.

Evaluación de indicadores clave como rendimiento de las brocas, consumo de explosivos, y costos de perforación y voladura en relación con los resultados obtenidos.

Tabla 13. ***Análisis de costos y eficiencia operativa: Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal***

Aspecto	Hallazgos	Acciones correctivas
Perforación	Costos elevados asociados al desgaste de herramientas y consum energético.	Optimizar parámetros de perforación, mejorar selección de brocas y aplicar mantenimiento preventivo.
Voladura	Ineficiencia en la dosificación de explosivos y costos elevados por tonelada fragmentada.	Ajustar la dosificación de explosivos, optimizar el tipo de explosivo y mejorar el diseño de voladuras.
Materiales (explosivos)	Uso subóptimo de explosivos encarece el costo por tonelada movida.	Evaluar alternativas de explosivos más económicas y eficientes.
Herramientas	Alta frecuencia de reemplazo de brocas y barras por desgaste excesivo.	Implementar un programa de monitoreo del desgaste y seleccionar herramientas más duraderas.
Equipos de protección (EPPS)	Costos moderados, pero alta necesidad de reposición en entornos agresivos.	Seleccionar EPPs de mayor durabilidad y realizar compras más eficientes.
Equipos Boome	Ineficiencia operativa por tiempos muertos y falta de mantenimiento.	Mejorar el programa de mantenimiento preventivo y capacitar al personal para maximizar la operatividad de los equipos.
Fragmentación	Fragmentos fuera del rango óptimo aumentan costos de manejo y transporte.	Ajustar los parámetros de voladura para lograr fragmentación uniforme y eficiente.
Tiempo de ciclo operativo	Tiempos extendidos por falta de coordinación entre perforación, voladura y transporte.	Mejorar la logística y sincronización de actividades.
Consumo de combustible	Altos costos por ineficiencias en la operación de equipos.	Optimizar rutas de transporte y mejorar la eficiencia energética de los equipos.

Fuente: Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

El análisis de costos y eficiencia operativa en el Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal destaca aspectos clave como perforación, voladura, materiales, herramientas, EPPs y equipos Boomer. Entre los hallazgos principales se identificaron altos costos por desgaste de herramientas, ineficiencia en la dosificación de explosivos, fragmentación subóptima, tiempos de ciclo extendidos y consumo elevado de combustible. Las acciones correctivas incluyen optimizar parámetros técnicos, implementar mantenimiento preventivo, mejorar la selección de materiales y herramientas, capacitar a los operadores y ajustar la logística para reducir tiempos y costos. Indicadores clave como costo por metro perforado, eficiencia de fragmentación y tiempos operativos guían estas mejoras, orientadas a maximizar la eficiencia y la rentabilidad.

4.2Realizar la caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal

Para la caracterización geomecánica del macizo rocoso en el Subnivel 75-2 este con un RMR de 50, se debe calcular cada parámetro de la clasificación RMR para obtener una visión precisa de la calidad del macizo rocoso. Un RMR de 50 indica que el macizo es de calidad baja, lo que podría implicar la necesidad de un diseño adecuado de sostenimiento y un control estricto de las operaciones mineras.

La evaluación geomecánica del macizo rocoso en el Subnivel 75-2 este, basada en la clasificación RMR (Rock Mass Rating), se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 14. ***Caracterización del macizo rocoso del Subnivel 75-2 este de la Unidad Minera San Cristóbal***

Parámetro	Valor	Ponderación	Puntaje (puntaje del parámetro)	Comentarios
1. Resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) (MPa)	8 MPa	15	4	Resistencia baja, entre 6 y 10 MPa, lo que sugiere una roca débil.
2. Calidad de las discontinuidades (Q)	3 (Moderada)	20	12	Discontinuidades moderadas, con fracturas visibles y rugosidad intermedia.
3. Espaciado de las discontinuidades (S)	0.6 m (Moderado)	20	14	Espaciado moderado, lo que permite un control razonable durante la excavación.

4. Condición de las discontinuidades (C)	Mala (más de 1 cm de apertura)	15	6	Las discontinuidades tienen aperturas mayores a 1 cm, lo que afecta la estabilidad.
5. Orientación de las discontinuidades (O)	Moderada (30°-45° respecto a la excavación)	20	12	La orientación de las discontinuidades es moderada, lo que puede afectar la estabilidad dependiendo de la dirección de la excavación.
6. Presencia de agua	Moderada	5	2	Moderada presencia de agua, que podría generar dificultades en el proceso de excavación y sostenimiento.

4.2.1 Cálculo del RMR (Rock Mass Rating)

El total sería la suma de los puntajes de cada parámetro. Con los valores de la tabla de ejemplo:

Total = 4(σc) + 12 (discontinuidades) + 14 (espaciado) + 6 (condición) +12 (orientación) + 2 (agua) = 50

Interpretación del RMR

Con un total de 50, el RMR cae en la categoría III A de roca moderada, lo que sugiere que la estabilidad del macizo rocoso es más débil que en situaciones de alta calidad de roca. Aunque la roca aún es excavable, puede presentar desafíos, como discontinuidades más grandes, mayor presencia de agua y un espaciado de discontinuidades más cerrado. Esto implica la necesidad de un diseño adecuado de perforación y voladura, así como de sostenimiento reforzado.

Este RMR indica que el diseño debe tener en cuenta la debilidad de la roca, y probablemente se necesitarán medidas adicionales para garantizar la seguridad y la eficiencia operativa. Es probable que el diseño de la voladura y las técnicas de perforación deban adaptarse a las condiciones de la roca más débil.

- Sostenimiento recomendado: pernos anclados de 2.4 m y malla metálica.
- Zonas críticas: considerar refuerzo adicional con concreto lanzado de 2 pulgadas.

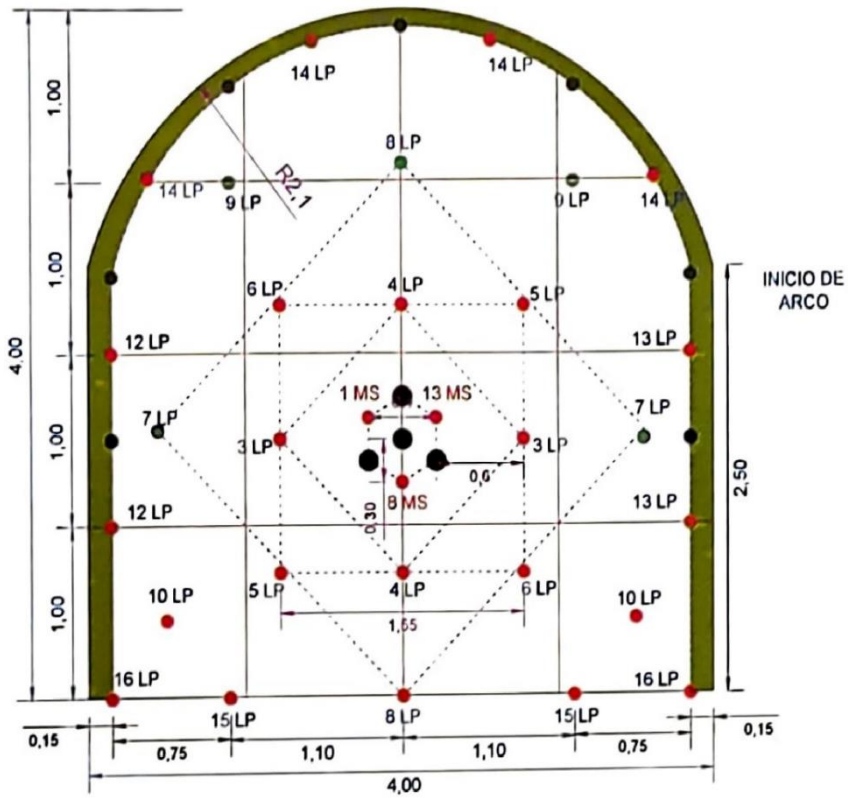
4.3. Realizar el cambio de los parámetros de perforación para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

La optimización de los parámetros de perforación constituye una estrategia clave para reducir los costos por metro lineal en el Subnivel 75-2 este. Esto implica analizar y ajustar variables como el diámetro de los taladros, la longitud y el ángulo de perforación, el patrón de la malla y el tipo de acero utilizado. Al implementar estos cambios, se busca maximizar la eficiencia en la fragmentación del macizo rocoso, minimizar la sobrerotura y reducir el desgaste del equipo.

La adopción de tecnologías avanzadas y técnicas de monitoreo continuo permite evaluar el impacto de las modificaciones en tiempo real, garantizando que los ajustes realizados generen un balance adecuado entre costos y productividad, manteniendo la seguridad y la calidad operativa.

4.2.2 Estado situacional de los parámetros de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este

El análisis de los parámetros de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este permite detectar problemas operativos de forma anticipada, optimizando el proceso mediante la recopilación y análisis continuo de datos geomecánicos, de perforación, voladura, fragmentación y sobrerotura. Esto facilita ajustes en diseños, disposición de taladros y uso de recursos, mejorando la seguridad, eficiencia y reduciendo costos. El avance de la rampa se ejecuta según el diseño de la malla de perforación y voladura.



DISTRIBUCIÓN DE CARGA							
MALLA 4.0 X 4.0		Kg/Catucho			P.mineral (ton/m3)		3.2
		0.27	0.25	0.17	P.desmonte (ton/m3)		2.7
DISTRIBUCION DE TALADROS	tal/disp.	DISTRIBUCIÓN DE CARGA					
		EMULNOR 3000 1 1/2" x 12"		EMULNOR 1000 1 1/2" x 12"		FAMECORTE (E)	
		N° CART.	KG. EXPL.	N° CART.	KG. EXPL.	N° CART.	KG. EXPL.
ARRANQUE	3	15	11.97		0.00		0.00
1ERA Y 2DA AYUDA	8	14	29.79		0.00		0.00
3ERA AYUDA	3		0.00	12	9.00		0.00
AYUDA DE HASTIAL	0		0.00		0.00		0.00
AYUDA DE CORONA	2	12	6.38	12	6.00		0.00
AYUDA DE ARRASTRE	2		0.00		0.00		0.00
HASTIALES	4		0.00	1	1.00	5	3.47
CORONA	4	13	13.83	1	1.00	5	3.47
ARRASTRE	5		0.00		0.00		0.00
TOTAL	31	54.0	62.0	26.0	17.0	10.0	6.9

Parametros de perforacion		
Taladros cargados	31	unid.
Taladros de alivio	7	unid.
Taladros Rimados	4	unid.
Taladros Perforados	42	unid.
Longitud de barra	12	pies
Avance efectivo 90%	3.02	m
Volumen por disparo	48.28	m3
Tonelaje por disparo	130.36	ton

Parametros de voladura	
Numero total de cartuchos (unid.)	90.0
Numero total de explosivos (kg.)	85.9
Factor de carga (kg/ml)	28.5
Total de fanel MS (unid.)	6.0
Total de fanel LS (unid.)	28.0
Cordon detonante (m)	30.0
Carmex (unid.)	2.0
Mecha rapida (m)	20.0

Fanel MS	
Retardo	Cantidad
1	2
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	2
9	
10	
11	
12	
13	2
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	

Fanel LS	
Retardo	Cantidad
1	
2	
3	2
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	
12	2
13	2
14	4
15	2
16	2

Figura 7. Estado actual: Diseño de la malla de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

Interpretación:

Como resultado de la voladura en el Sub Nivel 75-2 Este, se obtuvo la siguiente información:

- Tipo de material: Desmonte
- Volumen extraído: 48.28 m³
- Avance alcanzado por disparo: 2.51 metros
- Cantidad de explosivos empleados: 85.90 kg
- Factor de potencia: 28.50 kg/m

Tras la voladura realizada en el Subnivel 75-2 este, se obtuvo un avance considerado deficiente. Esto evidencia la necesidad de analizar y ajustar los parámetros actuales de perforación y voladura para mejorar la eficiencia del proceso y garantizar resultados óptimos en futuras operaciones.

El avance limitado obtenido evidencia la necesidad de realizar ajustes en los parámetros de perforación y voladura, con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso en este subnivel.

- **Análisis y control de parámetros de perforación del equipo Boomer S1D del estado situacional**

Los parámetros de perforación del equipo Boomer utilizado en los trabajos del Subnivel 75-2 este, desempeñan un papel fundamental en la evaluación y ajuste del proceso. Estos parámetros son determinantes para lograr un avance eficiente y una voladura de calidad. Su análisis es crucial para optimizar el rendimiento del equipo y reducir los costos operativos asociados.

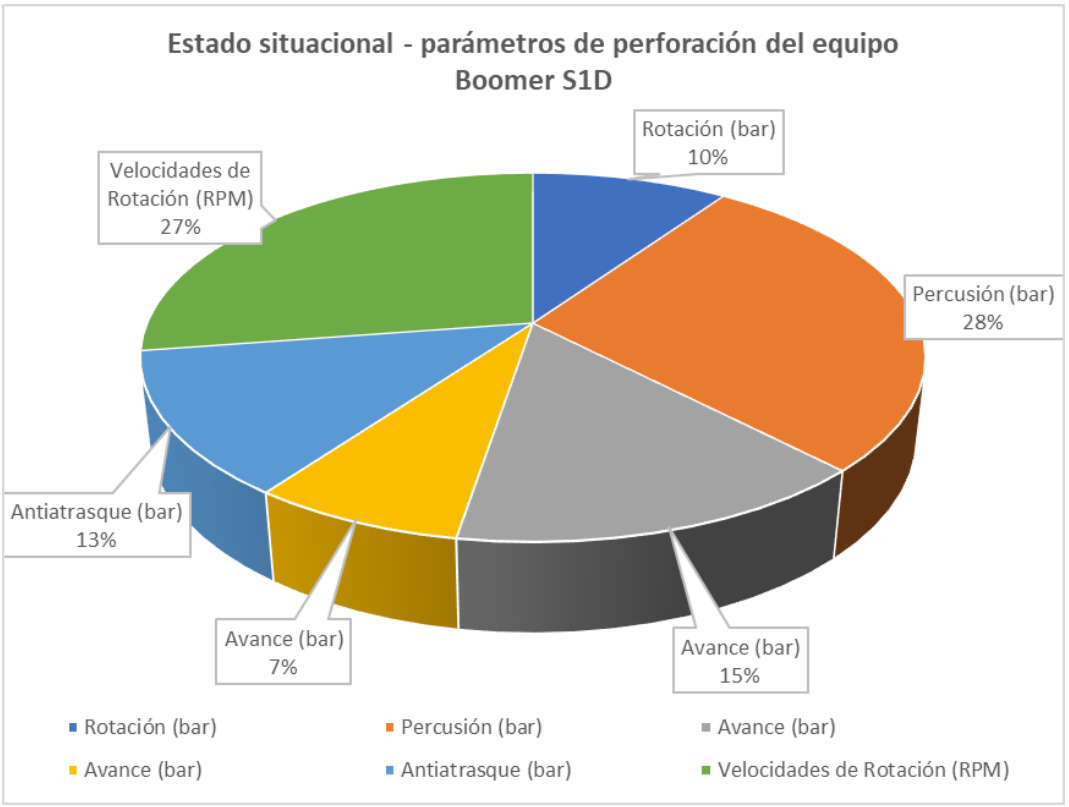


Figura 8. Estado situacional - Parámetros de perforación del equipo Boomer S1D

Esta figura ilustra las principales fallas operativas identificadas en el equipo de perforación empleado en el Subnivel 75-2 este. Se destacan los problemas mecánicos frecuentes, las dificultades asociadas a las características del macizo rocoso, las limitaciones en la habilidad de los operadores y el desgaste de las brocas debido a un mantenimiento insuficiente.

Figura 9. Estado situacional - Fallas operativas del equipo de perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

Comentario:

Los parámetros clave del equipo de perforación en el Subnivel 75-2 este incluye una rotación de 65 bar, percusión de 190 bar, avance en equipos frontoneros de 100 bar, avance en taladros de 50 bar, anti atasque de 85 bar y velocidades de rotación ajustables de hasta 185 RPM según el diámetro de la broca. Sin embargo, se han identificado fallas operativas como problemas recurrentes en los sistemas hidráulicos y eléctricos del equipo, desafíos relacionados con la dureza y abrasividad del material rocoso, errores en la alineación y manejo por parte de los operadores, y un desgaste excesivo de las brocas debido a un mantenimiento inadecuado, lo que afecta negativamente la productividad del proceso.

- **Estado situacional de los últimos 15 disparos del Subnivel 75-2 este**

La siguiente tabla muestra los datos correspondientes a los 15 disparos realizados en el Subnivel 75-2 este, previo a la implementación de las mejoras propuestas.

Tabla 15. ***Estado situacional de los últimos 15 disparos del Subnivel 75-2 este***

Nº de disparos	Longitud de barra (m)	Eficiencia de disparo (%)	Avance efectivo (m)	Volumen (m^3)	Tonelaje (t)
1	12	65%	2.18	34.87	94.15
2	12	80%	2.68	42.92	115.87
3	12	70%	2.35	37.55	101.39
4	12	80%	2.68	42.92	115.87
5	12	75%	2.51	40.23	108.63
6	12	80%	2.68	42.92	115.87
7	12	68%	2.28	36.48	98.49
8	12	67%	2.25	35.94	97.04
9	12	80%	2.68	42.92	115.87
10	12	75%	2.51	40.23	108.63
11	12	80%	2.68	42.92	115.87
12	12	77%	2.58	41.31	111.53
13	12	70%	2.35	37.55	101.39
14	12	75%	2.51	40.23	108.63
15	12	80%	2.68	42.92	115.87
Total		75%	2.51	40.13	108.34

Interpretación

En promedio, los quince disparos realizados con barra de 12 pies alcanzaron un avance efectivo de 2.51 metros, con una eficiencia de perforación del 80 % y un tonelaje movilizado de 108.34 toneladas. Estos resultados son insuficientes para cumplir con los requerimientos del desarrollo de avance en el Subnivel 75-2 este.

- **Estado situacional del análisis de la sobrerotura en el Subnivel 75-2 este**

El análisis de la sobrerotura posterior al disparo en el Subnivel 75-2 este se detalla en la figura siguiente, destacando las áreas afectadas y los parámetros relevantes evaluados.

Figura 10. Situación actual - análisis de la sobrerotura en el Subnivel 75-2 este
Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

Interpretación

El marcado incorrecto de la malla de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este provocó una distribución desordenada de los taladros, generando sobreroturas significativas: 11 % en los hastiales y 12 % en la corona. Esto aumentó las dimensiones de la sección planificada de 4.0 x 4.0 metros a 4.45 x 4.48 metros, afectando la estabilidad estructural y elevando los costos operativos debido al mayor consumo de explosivos y recursos, impactando negativamente la eficiencia del proceso.

- **Situación actual de la evaluación de la fragmentación en el Sub Nivel 75-2 Este**

Después del disparo, se llevó a cabo un análisis detallado de la fragmentación en el Subnivel 75-2 este, cuyos resultados se presentan en la figura siguiente.

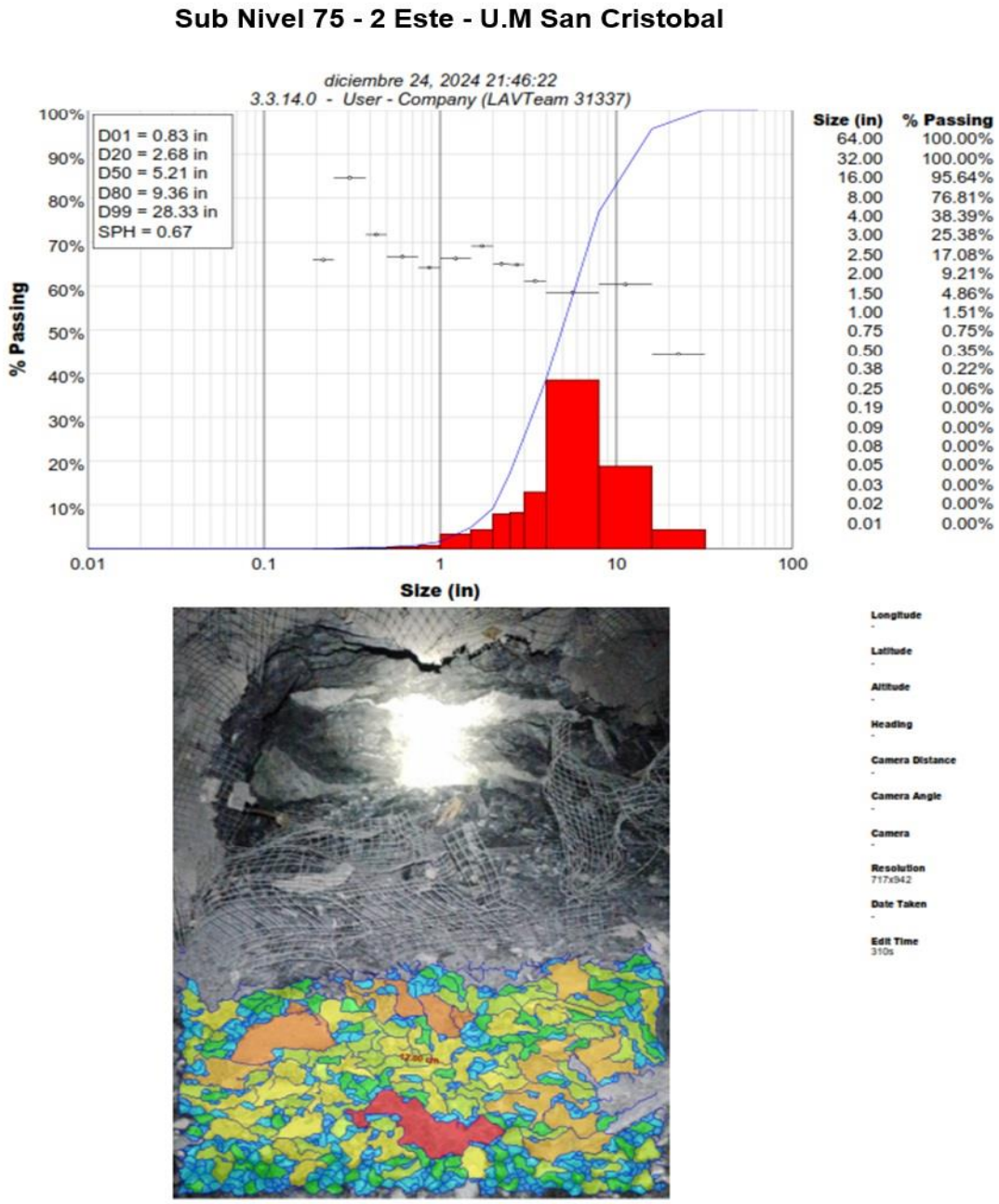


Figura 11. Situación actual de la evaluación de fragmentación en el Subnivel 75-2 este

Interpretación:

La curva granulométrica muestra una fragmentación inadecuada, con un 50 % pasando por una malla de 5.21" y un P80 atravesando una malla de 9.36". Esto indica una distribución poco eficiente de la energía de los explosivos, generando fragmentos de gran tamaño que complican las operaciones en el Subnivel 75-2 este.

4.2.3 Análisis del costo actual de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

Se presentan a continuación los parámetros de perforación y voladura correspondientes a la situación actual, resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 16. ***Medición de los parámetros actuales de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este***

Sub Nivel 75-2 Este - 4.0 m x 4.0 m			
Datos Técnicos:			
Tipo de roca	RMR 50 - categoría III A de roca moderada		
Ancho Labor (m)	4.0	Eficiencia de perforación (%)	75%
Alto Labor (m)	4.0	Eficiencia de disparo (%)	75%
Long. Barra (pie)	12.0	Longitud de carga (m)	1.72
NºTal. Frente (unid.)	42	Avance efectivo (m)	**2.51**
NºTal. Cargados (unid.)	31.0	Volumen disparado (m3 / disparo)	40.13
Factor de carga (kg/ml)	28.5	Longitud de avance de perforación (m)	2.58
kg explosivo (kg)	85.90	kilogramos/ taladro (m)	2.77

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

En el anexo 2, se detalla los costos operativos asociados a la perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este, proporcionando en el análisis situacional. La figura siguiente presenta la valorización con costos proyectados y reales, destacando áreas clave para optimizar recursos y mejorar la relación costo-beneficio en futuras operaciones tras la deficiencias operativas encontradas en este escenario actual.

Figura 12. Evaluación de los costos de perforación y voladura en función de los parámetros actuales de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este

Interpretación

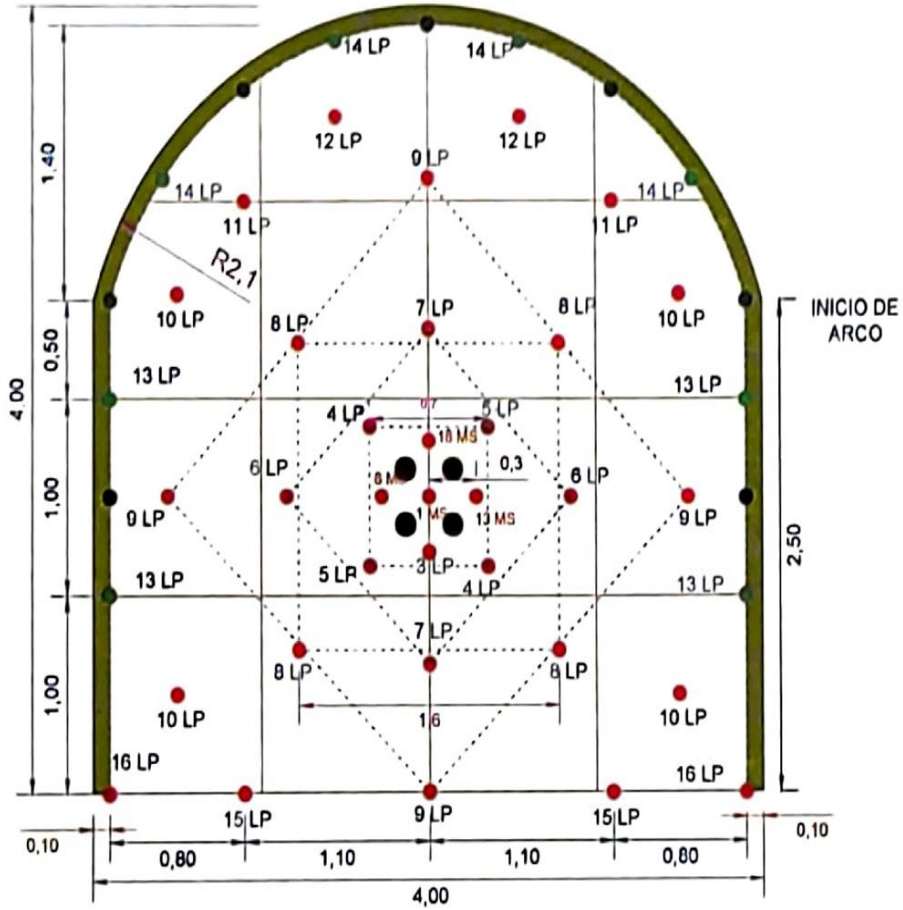
El costo total valorizado de la perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este asciende a 176.39 dólares por metro lineal. Este monto incluye los gastos asociados con la mano de obra, el uso de equipos especializados, el consumo de explosivos y otros insumos esenciales para ejecutar las labores. Si bien estos costos reflejan las condiciones operativas actuales, su magnitud pone de manifiesto la existencia de ineficiencias significativas en el proceso, las cuales deben ser abordadas para garantizar la sostenibilidad económica del proyecto.

Entre los principales factores que explican este elevado costo destacan las ineficiencias operativas en áreas clave como el diseño de la malla de perforación y voladura, la selección y aplicación de explosivos, y la ejecución misma del proceso. Un diseño deficiente de la malla puede derivar en una distribución inadecuada de energía explosiva, lo que provoca sobreroturas, fragmentación deficiente y un mayor consumo de recursos. Del mismo modo, la utilización de explosivos no adecuados a las características del macizo rocoso contribuye a un desempeño subóptimo, elevando innecesariamente los costos de operación.

4.2.4 Análisis de la optimización de los parámetros de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este

Tras las deficiencias encontradas en los parámetros de perforación y voladura como en las deficiencias operativas de los trabajadores es esencial implementar una metodología de optimización que mejore el diseño de la malla de perforación y voladura, adaptándola a las condiciones geomecánicas para maximizar la eficiencia de los explosivos y reducir costos en sostenimiento y limpieza. La selección de explosivos debe basarse en estudios técnicos que consideren las propiedades del macizo rocoso, asegurando una fragmentación uniforme.

Comparar los costos actuales con un escenario optimizado permitirá identificar áreas de mejora y aplicar mejores prácticas, incrementando la eficiencia sin comprometer la seguridad ni la calidad. Esta optimización reducirá los costos por metro lineal, mejorará la rentabilidad y promoverá una operación más sostenible y competitiva.



DISTRIBUCIÓN DE CARGA

MALLA 4.0 X 4.0		Kg/Catucho			P.mineral (ton/m3)	3.2	
		0.27	0.25	0.17	P.desmonte (ton/m3)	2.7	
		DISTRIBUCIÓN DE CARGA					
STRIBUCION DE TALADROS	tal/disp.	EMULNOR 3000 1 1/2" x 12"		EMULNOR 1000 1 1/2" x 12"		FAMECORTE (E)	
		N° CART.	KG. EXPL.	N° CART.	KG. EXPL.	N° CART.	KG. EXPL.
UE	5	17	22.61		0.00		0.00
DA AYUDA	8	14	29.79		0.00		0.00
TA AYUDA	8	13	27.66		0.00		0.00
E HASTIAL	2	12	6.38		0.00		0.00
E CORONA	4	11	11.70	1	1.00		0.00
E ARRASTRE	2	13	6.91	1	0.50		0.00
ES	4		0.00	12	12.00		0.00
A	4		0.00	11	11.00		0.00
RE	4	13	13.83		0.00		0.00
TOTAL	41	93.0	118.9	25.0	24.5	0.0	0.0

Parametros de perforacion		
s cargados	41	unid.
s de alivio	7	unid.
s Rimados	4	unid.
s Perforados	52	unid.
d de barra	14	pies
efectivo 88%	3.5	m
n por disparo	55.79	m3
e por disparo	150.63	ton

Parametros de voladura	
Numero total de cartuchos (unid.)	118.0
Numero total de explosivos (kg.)	143.4
Factor de carga (kg/ml)	41.1
Total de fanel MS (unid.)	8.0
Total de fanel LS (unid.)	38.0
Cordon detonante (m)	30.0
Carmex (unid.)	2.0
Mecha rapida (m)	20.0

Fanel MS	
Retardo	Cantidad
1	2
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	2
9	
10	
11	
12	
13	2
14	
15	
16	
17	
18	2
19	
20	

Fanel LS	
Retardo	Cantidad
1	
2	
3	2
4	2
5	2
6	2
7	2
8	4
9	4
10	4
11	2
12	2
13	4
14	4
15	2
16	2

***Figura 13. Optimización del diseño de la malla de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal* (7)**

Interpretación:

Como resultado de la voladura en el Subnivel 75-2 este, se obtuvo la siguiente información:

- Tipo de material: Desmonte
- Volumen extraído: 56.04 m³
- Avance alcanzado por disparo: 3.50 metros
- Cantidad de explosivos empleados: 143.40 kg
- Factor de potencia: 41.10 kg/m

Tras la voladura realizada en el Subnivel 75-2 este, se obtuvo un avance considerado eficiente. Esto evidencia la mejora de los parámetros de perforación y voladura para mejorar la eficiencia del proceso y garantizar resultados más óptimos en las operaciones.

- **Optimización de los parámetros de perforación del equipo Boomer S1D en el Subnivel 75-2 este**

El análisis y control de los parámetros de perforación del equipo Boomer S1D en el Subnivel 75-2 este es clave para identificar oportunidades de mejora en el rendimiento y la eficiencia operativa. Este equipo, diseñado para trabajos de alta precisión, requiere un ajuste continuo de parámetros como rotación, percusión, avance y anti atasque para adaptarse a las condiciones específicas del macizo rocoso.

Enfocarse en la mejora de estos parámetros implica evaluar la interacción entre el equipo y la roca, optimizando la velocidad de rotación y la presión de percusión para evitar desgaste innecesario en los componentes y maximizar la vida útil de las barras de perforación. Además, un control más riguroso del avance y del sistema anti atasque puede prevenir daños en el equipo y reducir los tiempos improductivos durante las operaciones.

Implementar un sistema de monitoreo constante para registrar y analizar estos parámetros permitirá detectar ineficiencias en tiempo real, facilitando ajustes inmediatos. Este enfoque no solo mejorará la calidad de la perforación y la voladura, sino que también contribuirá a reducir los costos operativos, aumentando la productividad y garantizando el cumplimiento de los objetivos de avance en el Subnivel 75-2 este.

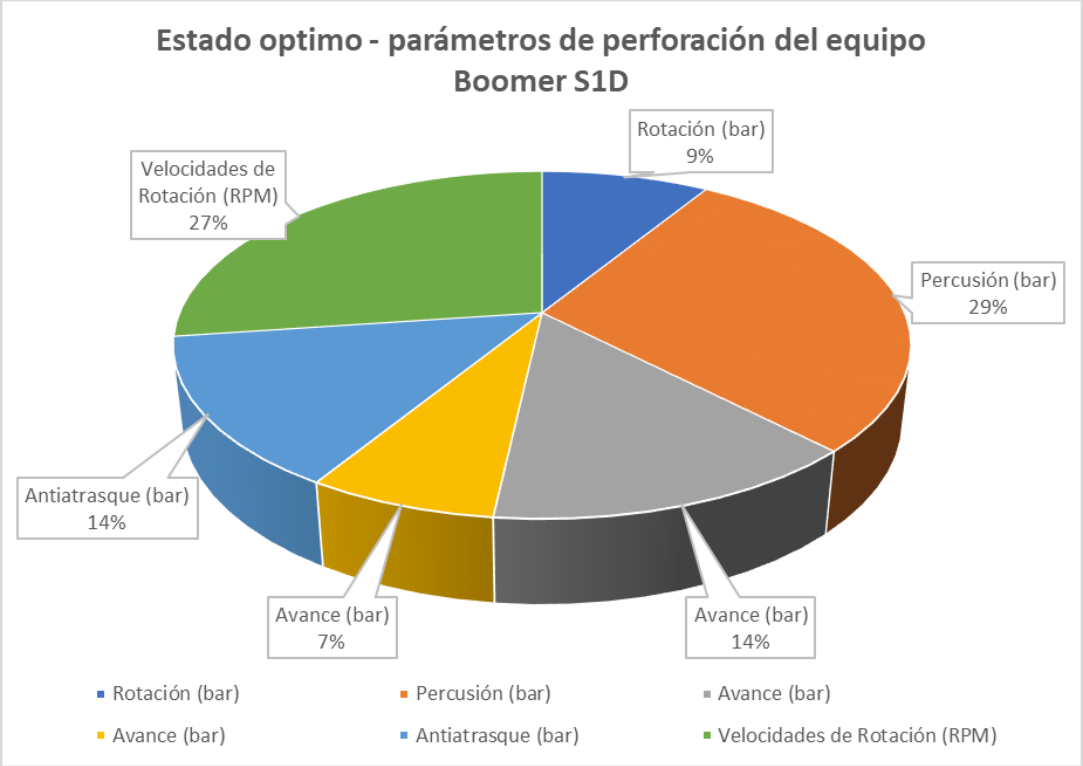


Figura 14. Estado óptimo - Parámetros de perforación del equipo Boomer S1D

Esta figura ilustra la mejora de los parámetros ce perforación con el equipo Boomer S1D identificadas en el equipo de perforación empleado en el Subnivel 75-2 este.

En la siguiente figura se muestra la mejoras de las fallas operativas encontradas en el escenario actual.

Tabla 17. ***Estado óptimo - Fallas operativas del equipo de perforación del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal***

Factor	Estado situacional	Estado óptimo
Equipo	El equipo sufre fallas mecánicas constantes, especialmente en los componentes hidráulicos o eléctricos.	Mantener el equipo en buenas condiciones mediante un mantenimiento adecuado, minimizando tiempos de inactividad y reduciendo fallas mecánicas.
Tipo de roca	La perforación presenta dificultades debido a la dureza o abrasividad alta del material rocoso.	Ajustar los parámetros de perforación según las características del macizo rocoso, para evitar daños a la maquinaria por esfuerzos excesivos.
Habilidad del operador	Se cometen errores operativos, como una mala alineación en la perforación o el uso incorrecto de los controles.	Capacitar a los operadores para mejorar sus habilidades técnicas, asegurando un manejo eficiente y preciso del equipo según los parámetros establecidos.
Afilado de brocas	El desgaste o la falta de mantenimiento adecuado afectan la eficiencia y velocidad de perforación.	Implementar un programa regular para afilar las brocas, comenzando cuando el desgaste llegue a un tercio del inserto, lo que ayuda a mantener la eficiencia.

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

Interpretación:

Los parámetros óptimos del equipo de perforación en el Subnivel 75-2 este, incluyen una rotación de 50 bar, percusión de 165 bar, avance en equipos frontoneros de 80 bar, avance en taladros de 40 bar, anti atasque de 80 bar y velocidades de rotación ajustables de hasta 155 RPM para diámetro de la broca de 51 mm. Sin embargo, se han corregido las fallas operativas como problemas el equipo recurrentes en los sistemas hidráulicos y eléctricos del equipo, mejora en la interpretación de la dureza y abrasividad del material rocoso, corrigiendo los errores en la alineación y manejo por parte de los operadores, disminuyendo el desgaste excesivo de las brocas con un buen mantenimiento y mejorando la productividad.

- **Estado óptimo de los últimos 15 disparos del Subnivel 75-2 este**

La siguiente tabla muestra los datos correspondientes a los 15 disparos realizados en el Subnivel 75-2 este, con las mejoras propuestas realizadas.

Tabla 18. ***Estado óptimo de los últimos 15 disparos del Subnivel 75-2 este***

Nº de disparos	Longitud de barra (m)	Eficiencia de disparo (%)	Avance efectivo (m)	Volumen (m^3)	Tonelaje (t)
1	14	90%	3.57	57.06	154.06
2	14	90%	3.57	57.06	154.06
3	14	85%	3.37	53.89	145.50
4	14	90%	3.57	57.06	154.06
5	14	90%	3.57	57.06	154.06
6	14	85%	3.37	53.89	145.50
7	14	88%	3.49	55.79	150.63
8	14	90%	3.57	57.06	154.06
9	14	88%	3.49	55.79	150.63
10	14	90%	3.57	57.06	154.06
11	14	85%	3.37	53.89	145.50
12	14	90%	3.57	57.06	154.06
13	14	85%	3.37	53.89	145.50
14	14	90%	3.57	57.06	154.06
15	14	90%	3.57	57.06	154.06
	Total	88%	3.50	56.04	151.32

Interpretación

En promedio, los quince disparos realizados con barra de 14 pies alcanzaron un avance efectivo de 3.50 metros, con una eficiencia de perforación del 88 % y un tonelaje movilizado de 151.32 toneladas. Estos resultados son eficientes para cumplir con los requerimientos del desarrollo de avance en el Subnivel 75-2 este.

- **Estado óptimo del análisis de la sobrerotura en el Subnivel 75-2 este**

El análisis de la sobrerotura posterior al disparo en el Subnivel 75-2 este se detalla en la figura siguiente.

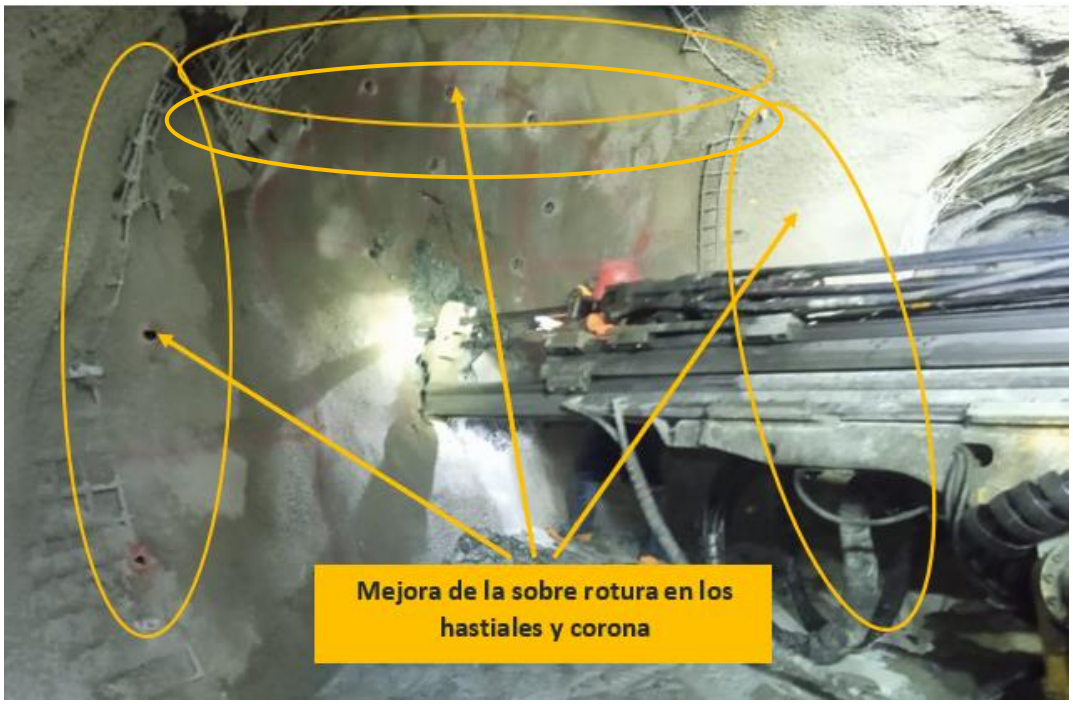


Figura 15. Situación óptima - análisis de la sobrerotura en el Subnivel 75-2 este

Interpretación

El marcado correcto de la malla de perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este mejoró en la distribución de los taladros, disminuyendo la sobreroturas significativamente en 2.5 % en los hastiales y 3 % en la corona. Lo cual en las dimensiones de la sección planificada de 4.0 x 4.0 metros se obtuvo una sección de 4.10 x 4.12 metros, mejorando así la estabilidad estructural de labor y reduciendo los costos operativos debido al menor consumo de explosivos por metro lineal, impactando positivamente en la eficiencia operacional.

- **Situación óptimo de la evaluación de la fragmentación en el Subnivel 75-2 este**

Después del disparo, se llevó a cabo un análisis detallado de la fragmentación en el Subnivel 75-2 este, cuyos resultados se presentan en la figura siguiente.

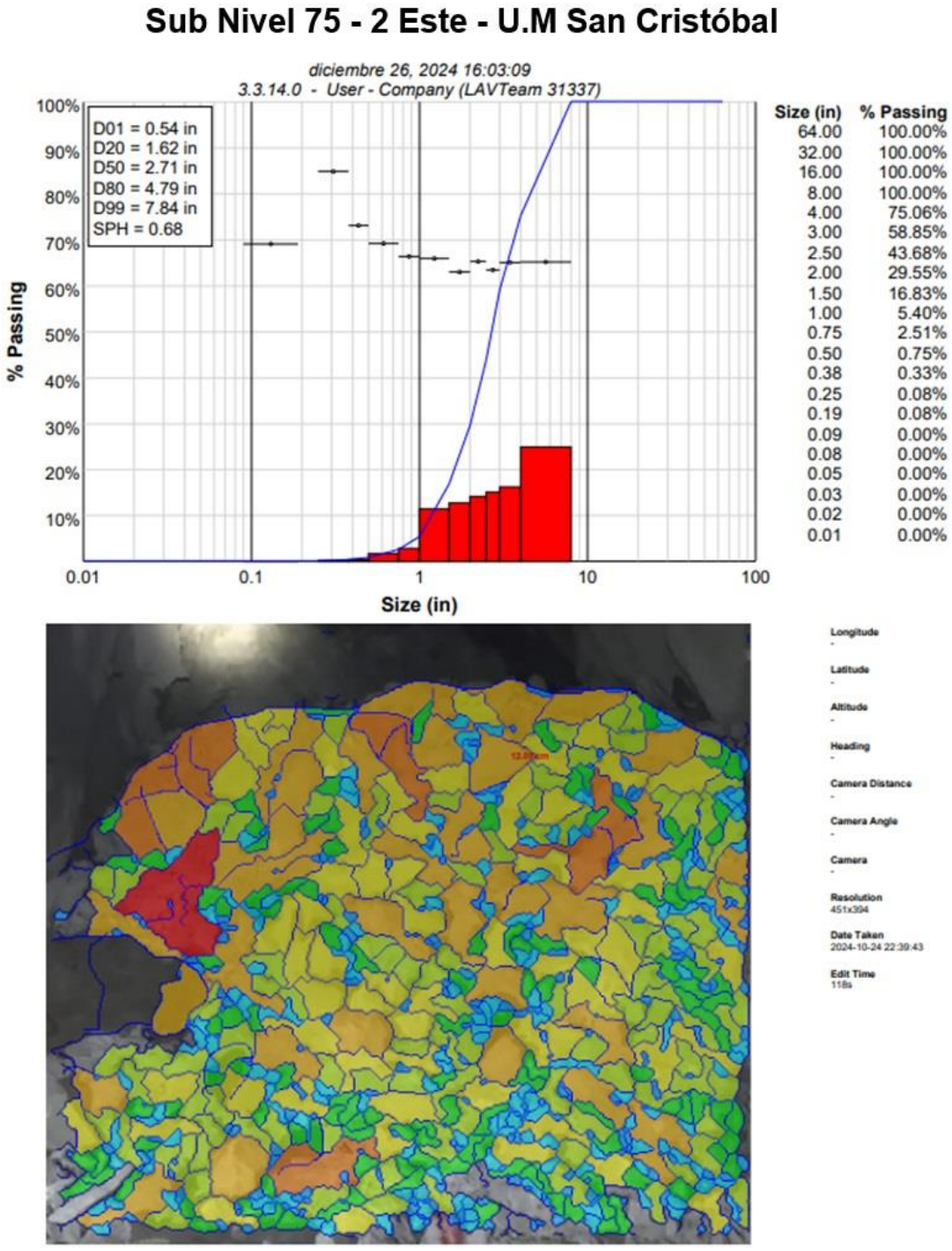


Figura 16. Situación óptima evaluación fragmentación en el Subnivel 75-2 este

Interpretación:

La curva granulométrica muestra una fragmentación inadecuada, con un 50 % pasando por una malla de 2.71" y un P80 atravesando una malla de 4.79". Esto indica una distribución eficiente de la energía de los explosivos, generando fragmentos de buen tamaño para el carguío y acarreo del material desbrozado del Subnivel 75-2 este.

4.2.5 Análisis del costo óptimo de la perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

Se presentan a continuación los parámetros de perforación y voladura correspondientes a la situación óptima, resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 19. ***Medición de los parámetros óptimos de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este***

Sub Nivel 75-2 Este - 4.0 m x 4.0 m			
Datos Técnicos:			
Tipo de roca:	RMR 50 - categoría III A de roca moderada		
Ancho Labor (m)	4.0	Eficiencia de perforación (%)	90%
Alto Labor (m)	4.0	Eficiencia de disparo (%)	90%
Long. Barra (pie)	14.0	Longitud de carga (m)	2.45
NºTal. Frente (unid.)	52	**Avance efectivo (m)**	3.5
NºTal. Cargados (unid.)	41	Volumen disparado (m3 / disparo)	56.04
Factor de carga (kg/ml)	41.10	Longitud de avance de perforación (m)	3.68
kg explosivo (kg)	143.4	kilogramos/ taladro (m)	3.50

Tomada del Departamento de Operaciones de la Unidad Minera San Cristóbal (7)

En el anexo 3, se detalla los costos operativos asociados a la perforación y voladura en el Subnivel 75-2 este, proporcionando en el análisis optimizado.

La figura siguiente presenta la valorización con costos optimizados y reales, mejorando el ciclo de avance del Subnivel 75-2 este como reduciendo los costos operacionales.

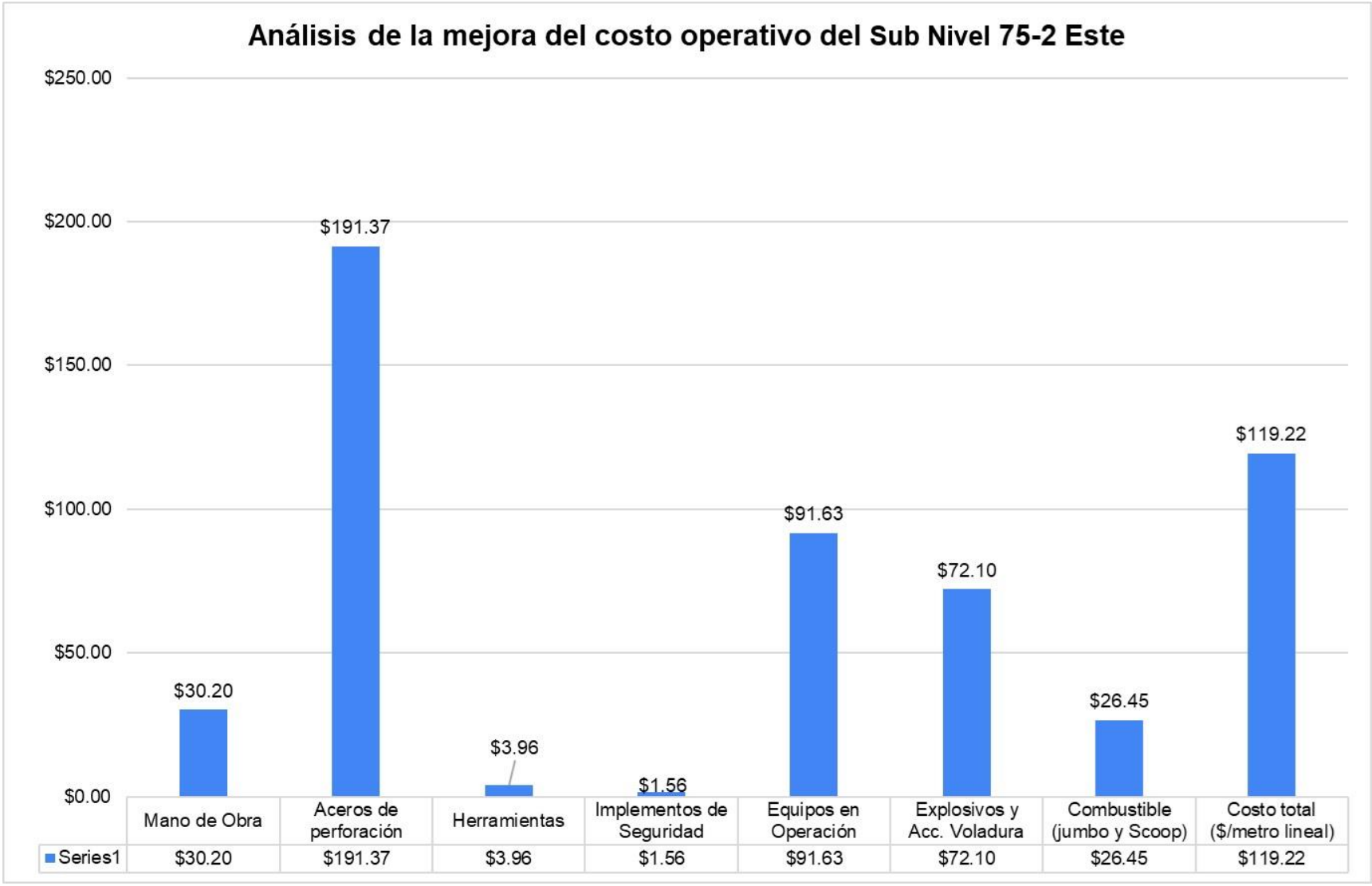


Figura 17. Evaluación de los costos de perforación y voladura en función a los parámetros óptimos de perforación y voladura del Subnivel 75-2 este

Interpretación

La optimización realizada en el Subnivel 75-2 este ha generado resultados altamente significativos en términos de costos y productividad. El costo total por metro lineal de perforación y voladura fue de $119.22, lo que representa un ahorro notable de $57.17 por metro lineal de avance en comparación con los costos iniciales. Este ahorro refleja un impacto directo en la economía del proyecto, permitiendo liberar recursos para otras áreas críticas y mejorar la competitividad operativa.

Por otro lado, el avance por disparo experimentó un incremento de 1 metro, una mejora que tiene implicaciones importantes en la productividad general del proyecto. Este aumento en la longitud de avance permite completar las actividades en menos tiempo, optimizando el ciclo de minado y reduciendo los costos indirectos asociados a tiempos de espera y reubicación de equipos.

Estos resultados fueron posibles gracias a la implementación de estrategias específicas en varios aspectos técnicos clave. La optimización del diseño de la malla permitió una distribución más eficiente de los barrenos, garantizando una fragmentación uniforme y minimizando la sobrerotura, lo cual también reduce los costos de sostenimiento. La selección precisa de explosivos adecuados a las características del macizo rocoso incrementó la eficiencia energética de las detonaciones, mientras que la planificación detallada de la secuencia de detonación aseguró un control efectivo de la vibración y mejoró la seguridad operativa.

4.4Prueba de hipótesis

4.4.1.Prueba de hipótesis general

En esta investigación se establecieron dos hipótesis generales, la hipótesis nula y la hipótesis alternativa, descritas de la siguiente manera:

a) Hipótesis nula

- Ho: Las técnicas de control en perforación no será factible ni viable para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

b) Hipótesis alternativa

- Ha: Las técnicas de control en perforación será factible y viable para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

4.4.2. Análisis de datos

La hipótesis planteada en esta investigación sugiere que existe una relación significativa que demuestra la factibilidad y viabilidad del replanteo de los parámetros de perforación y voladura para controlar la fragmentación del Subnivel 75-2 este. Esto se evidenció al comparar los resultados obtenidos en 10 disparos realizados antes y después de la optimización.

- **Criterios de decisión:**

- Si $P \geq 0.05$, se acepta la hipótesis alternativa (Ha) y se rechaza la hipótesis nula (Ho).
- Si $P < 0.05$, se acepta la hipótesis nula (Ho) y se rechaza la hipótesis alternativa (Ha).

En la siguiente tabla se muestra la comparación de los quince disparos en el escenario actual y optimo del Subnivel 75-2 este.

Tabla 20. ***Comparación de los quince disparos en el escenario actual y optimo del Subnivel 75-2 este***

Numero de disparo	*ESCENARIO ACTUAL " barra de 12 pies"*	*ESCENARIO OPTIMO "barra de 14 pies"*
1	2.18	3.57
2	2.68	3.57
3	2.35	3.37
4	2.68	3.57
5	2.51	3.57
6	2.68	3.37
7	2.28	3.49
8	2.25	3.57
9	2.68	3.49
10	2.51	3.57
11	2.68	3.37
12	2.58	3.57
13	2.35	3.37
14	2.51	3.57
15	2.68	3.57

a) Prueba de t para muestras relacionada

Tabla 21. ***Estadísticas de muestras relacionadas***

Estadísticos de muestras relacionadas

		Media	N	Desviación típ.	Error típ. de la media
Par 1	S.ACTUAL	2,5067	15	,18102	,04674
	S.OPTIMA	3,5060	15	,08919	,02303

Correlaciones de muestras relacionadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	S.ACTUAL y S.OPTIMA	15	-,011	,970

Prueba de muestras relacionadas

		Diferencias relacionadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación típ.	Error típ. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	S.ACTUAL - S.OPTIMA	-,99933	,20264	,05232	-1,11155	-,88711	-19,100	14	,000

Interpretación:

Con un valor de P de 0.000, inferior al umbral establecido de 0.05, se valida la hipótesis alternativa (Ha) y se descarta la hipótesis nula (Ho). Esto demuestra que las técnicas de control en perforación serán factible y viable para disminuir el costos por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal. Los resultados obtenidos destacan la eficacia de las estrategias implementadas, evidenciando un impacto positivo en las operaciones mineras.

CONCLUSIONES

1. Tras la caracterización geomecánica con un RMR de 50, clasificado como roca moderada (categoría III A), se identifica una estabilidad reducida del macizo rocoso, con desafíos como discontinuidades grandes, presencia de agua y espaciado cerrado. Esto requiere ajustes en el diseño de perforación, voladura y sostenimiento, incluyendo pernos anclados de 2.4 m, malla metálica y concreto lanzado de 2 pulgadas en zonas críticas para garantizar seguridad y eficiencia.

2. Tras los disparos en el escenario actual del Subnivel 75-2 este, se generó un avance deficiente de 2.51 metros por disparo con una barra de 12 pies y un costo elevado de $176.39 por metro lineal, debido a ineficiencias en el diseño de la malla, selección de explosivos y ejecución del proceso de desarrollo. Las sobreroturas fueron del 11 % en hastiales y 12 % en la corona aumentando así las dimensiones planificadas, afectando la estabilidad y elevando los costos.

3. Los parámetros de perforación tuvieron un incremento del 16 % de lo estandarizado, lo que generó una fragmentación inadecuada, con un P80 de 9.36", complicando las operaciones. Factores como fallas en los equipos, desgaste excesivo de brocas y errores en el manejo también impactaron negativamente, resaltando la necesidad de ajustes para optimizar la eficiencia y reducir costos.

4. Tras los disparos en el escenario optimo del Subnivel 75-2 este, se generó un avance eficiente de 3.50 metros por disparo con una barra de 14 pies y un costo elevado de $ 119.22 por metro lineal, debido a las eficiencias en el diseño de la malla, selección de explosivos y ejecución del proceso de desarrollo.

5. Las sobreroturas fueron del 2.5 % en hastiales y 3 % en corona manteniendo así las dimensiones planificadas y los costos operativos. Los parámetros de perforación dentro de lo estandarizado, lo que generó una fragmentación adecuada, con un P80 de 4.79", ideal para las operaciones transporte de material desbrozado. Se logró un ahorro de $57.17 dólares por metro lineal y mejorando la productividad con 1 metro adicional de avance por disparo.

6. El análisis estadístico revela un valor de P de 0.000, menor al límite de 0.05, confirmando la hipótesis alternativa (Ha) y rechazando la nula (Ho). Esto valida que las técnicas de control en perforación son factibles y viables para reducir los costos por metro lineal en el Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal, destacando la efectividad de las estrategias aplicadas y su impacto positivo en las operaciones mineras.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ajustar los parámetros de perforación y voladura en base a las características geomecánicas del macizo. Esto incluye asegurar que la malla de perforación esté bien diseñada para evitar sobreroturas y mejorar la fragmentación del material, como se observa en el escenario óptimo. También es crucial seleccionar los explosivos adecuados y asegurar la correcta secuencia de detonación.

2. En el Subnivel 75-2 este se identificaron ineficiencias en el avance y el costo elevado por metro lineal, lo que sugiere que los parámetros de perforación, como la presión de percusión y las velocidades de rotación, deben ser revisados. Es esencial mantener los parámetros dentro de los valores estandarizados, tal como se logró en el escenario óptimo, para evitar una fragmentación inadecuada y costos adicionales.

3. El desgaste excesivo de las brocas y los problemas recurrentes en los sistemas hidráulicos y eléctricos afectan la productividad. Se recomienda un plan de mantenimiento preventivo para los equipos de perforación y un seguimiento de las condiciones operativas, con el fin de reducir fallas y maximizar la eficiencia en las perforaciones.

4. Dado que la implementación de las mejoras en el diseño de perforación, selección de explosivos y malla ha demostrado una reducción significativa en los costos y un aumento en el avance, es recomendable seguir ajustando estos parámetros para lograr un control más preciso de los costos operativos. Además, las estrategias que resultaron en un ahorro de $57.17 por metro lineal deben ser replicadas en otros subniveles o áreas para mejorar la rentabilidad general.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARIN. Jhoni. Perforación y voladura controlada para mejorar avance y sobrerotura en profundización de Rampa Patrick V - Minera Aurífera Retamas S.A. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2021.

2. CONDORI, Miguel y VELAZCO, Jhorlan. Optimización de perforación y voladura por el método de Roger Holmberg en minera aurífera Estrella de Chaparra S.A. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Arequipa : Universidad Tecnológica del Perú, 2021.

3. BACA, Mirko y HINOSTROZA, Jack. Diseño de la malla de perforación y voladura para el control y estabilidad del macizo rocoso en la Unidad Minera San Cristóbal. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo : Universidad Continental, 2021.

4. HUINCHO, Jhonatan. Optimización del proceso de perforación y voladura para mejorar la eficiencia de avance y controlar la sobrerotura en los frentes de avance de la unidad minera Cerro Lindo, Nexa Resources S. A. A. Tesis (Título de Ingeniero de Minas).. Huancayo : Universidad Continental, 2022.

5. BELTRAN, Saraias. Diseño de malla de perforación y voladura para optimizar la productividad en una mina subterránea en Pataz La Libertad 2020. Tesis (Título de Ingeniero de Minas).. Trujillo : Universidad Privada del Norte, 2022.

6. DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA. *Informe de estudio de las reservas y recursos minerales.* Yauli - Oroya : Unidad Minera San Cristóbal, 2020.

7. DEPARTAMENTO DE OPERACIONEs. *Desarrollo del Sub Nivel 75-2 Este.* Yauli : Unidad Minera San Cristóbal, 2022.

8. DEPARTAMENTO DE GEOMECANICA. *Modelo de la caracterizacion geomecanica.* Yauli : Unidad Minera San Cristóbal, 2024.

9. EPIROC S.A. *Factores y parámetros de perforación de rocas* . Lima : Rock Drilling Tools, 2021.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

Técnicas de control en perforación para disminuir el costo por metro lineal del Sub nivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general
¿Cómo influye las técnicas de control en perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal?	Desarrollar las técnicas de control en perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.	Las técnicas de control en perforación serán factible y viable para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.
Problemas específicos	**Objetivos específicos**	**Hipótesis específicas**
¿Cómo influye la caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal?	Realizar la caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este Este para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal	La caracterización geomecánica del Subnivel 75-2 este será factible para la aplicación de las técnicas de control en perforación, Unidad Minera San Cristóbal.
¿Cómo influye el cambio de los parámetros de perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal?	Realizar el cambio de los parámetros de perforación para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.	El cambio de los parámetros de perforación será factible y viable para disminuir el costo por metro lineal del Subnivel 75-2 este, Unidad Minera San Cristóbal.

Anexo 2

Valorización del costo de perforación y voladura en el escenario situacional del Subnivel 75-2

A. Costo de mano de obra

Sub nivel 75-2 Este - 4.0 m x 4.0 m

Taladros Perforados /disparo	42.0	Longitud efectiva Perforación mts	2.58
Taládros cargados	31.0	Eficiencia perforación	75%
Factor de carga (Kg/taladro) :	2.8	Rendimiento (m/disparo):	2.51

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.1 Mano de Obra						**42.11**
Capataz	tarea	1	20%	26.32	5.26	
Bodeguero	tarea	1	20%	26.32	5.26	
Mecánico	tarea	1	20%	26.32	5.26	
electricista Equipos	tarea	1	20%	26.32	5.26	
Operador Jumbo	tarea	1	100%	30.70	30.70	
Ayudante Jumbo	tarea	1	100%	30.70	30.70	
Operador Scoop	tarea	1	50%	30.70	15.35	
Ayudante	tarea	1	40%	13.16	5.26	
Ayudante de servicios	tarea	1	20%	13.16	2.63	

B. Costo de aceros de perforación

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.2 Aceros de perforación						**165.76**
Aceite de Perforación	Gln	0.33	100%	7.23	2.39	
Barras de Perforación	mp	378.00	100%	0.22	81.90	
Brocas de perforación 51 mm	mp	378.00	100%	0.35	134.01	
Rimadora	mp	99.00	100%	1.50	148.77	
Shank adapter	mp	378.00	100%	0.09	35.48	
Copas de afilado	mp	378.00	100%	0.04	13.51	

C. Costo de herramientas

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.3 Herramientas						**8.72**
Lampa	pieza	2.00	100%	0.14	0.28	
Pico	pieza	2.00	100%	0.16	0.31	
Combo 6 Lbs	pieza	1.00	100%	0.10	0.10	
Llave Stilson de 8"	pieza	1.00	100%	0.07	0.07	
LLave Francesa 8"	pieza	1.00	100%	0.06	0.06	
Maquina Ban Dit	pieza	1.00	100%	0.48	0.48	
Cinta Ban Dit 1/2	rollo	1.00	100%	0.51	0.51	
Cinta Ban Dit 3/8	rollo	1.00	100%	0.43	0.43	
Barretilla de 4'	pieza	1.00	100%	0.26	0.26	
Barretilla de 6'	pieza	1.00	100%	0.31	0.31	
Barretilla de 8'	pieza	1.00	100%	0.34	0.34	
Barretilla de 10'	pieza	1.00	100%	0.38	0.38	
Barretilla de 12'	pieza	1.00	100%	0.38	0.38	
Tubo PVC 1 1/2 x 3.00 Mts.	uni	15.00	100%	0.95	14.21	
Disco de jebe	pieza	1.00	100%	0.05	0.05	
Taco de Arcilla	pieza	31.00	100%	0.05	1.63	
Ocre Polvo Rojo	kg	0.17	100%	2.63	0.44	
Escaleras telescopicas	pieza	1.00	100%	1.47	1.47	
Arco de sierra + hoja	pieza	1.00	100%	0.17	0.17	

D. Costo de implementos de seguridad

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.4 Implementos de Seguridad						**2.18**
Tareas sin ropa de agua	tareas	6.00	100%	0.59	3.57	
Tareas con ropa de agua	tareas	3.00	100%	0.63	1.90	

E. Costo de equipos en operación

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.5 Equipos en Operación						**127.77**
Jumbo 01 Brazo	Hm	2.82	100%	62.23	175.49	
Scooptram Epiroc S1D	Hm	2.80	100%	51.86	145.21	

F. Costo de explosivos y accesorios voladura

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
(B) **Explosivos y Acc. Voladura**						**63.59**
EMULNOR 3000 1 1/2 X 12	kg	62.00	100%	1.44	89.35	
EMULNOR 1000 1 1/2 X 13	kg	17.00	100%	1.04	17.68	
FAMECORTE	kg	6.90	100%	1.11	7.63	
FANEL MS	und	6.00	100%	0.88	5.27	
FANEL LS	und	28.00	100%	0.88	24.60	
CORDON DETONANTE	m	30.00	100%	0.29	8.70	
CARMEX	und	2.00	100%	0.88	1.76	
MECHA RAPIDA	m	20.00	100%	0.23	4.63	
(C) **Combustible**						**36.88**
Petroleo Jumbo	Gln	4.23	100%	6.00	25.38	
Petroleo Scoop	Gln	11.20	100%	6.00	67.20	
COSTO TOTAL POR UNIDAD VALORIZADA (A+B+C)						447.00
COSTO POR METRO LINEAL DE AVANCE ($/ml)						178.09

Tomada de Área de Operaciones Mina - UMSC

Anexo 3

Valorización del costo de perforación y voladura en el escenario óptimo del Subnivel 75-2

A. Costo de mano de obra

Sub Nivel 75-2 Este - 4.0 m x 4.0 m

Taladros Perforados /disparo	52.0	Longitud efectiva Perforación mts	3.68
Taládros cargados	41.0	Eficiencia perforación	90%
Factor de carga (Kg/taladro) :	3.5	Rendimiento (m/disparo):	3.50

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.1 Mano de Obra						**30.20**
Capataz	tarea	1	20%	26.32	5.26	
Bodeguero	tarea	1	20%	26.32	5.26	
Mecânico	tarea	1	20%	26.32	5.26	
electricista Equipos	tarea	1	20%	26.32	5.26	
Operador Jumbo	tarea	1	100%	30.70	30.70	
Ayudante Jumbo	tarea	1	100%	30.70	30.70	
Operador Scoop	tarea	1	50%	30.70	15.35	
Ayudante	tarea	1	40%	13.16	5.26	
Ayudante de servicios	tarea	1	20%	13.16	2.63	

B. Costo de aceros de perforación

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.2 Aceros de perforación						**191.37**
Aceite de Perforación	Gln	0.33	100%	7.23	2.39	
Barras de Perforación	mp	655.20	100%	0.22	141.96	
Brocas de perforación 51 mm	mp	655.20	100%	0.35	232.28	
Rimadora	mp	138.60	100%	1.50	208.27	
Shank adapter	mp	655.20	100%	0.09	61.49	
Copas de afilado	mp	655.20	100%	0.04	23.42	

C. Costo de herramientas

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.3 Herramientas						**3.96**
Lampa	pieza	2.00	100%	0.14	0.28	
Pico	pieza	2.00	100%	0.16	0.31	
Combo 6 Lbs	pieza	1.00	100%	0.10	0.10	
Llave Stilson de 8"	pieza	1.00	100%	0.07	0.07	
LLave Francesa 8"	pieza	1.00	100%	0.06	0.06	
Maquina Ban Dit	pieza	1.00	100%	0.48	0.48	
Cinta Ban Dit 1/2	rollo	1.00	100%	0.51	0.51	
Cinta Ban Dit 3/8	rollo	1.00	100%	0.43	0.43	
Barretilla de 4'	pieza	1.00	100%	0.26	0.26	
Barretilla de 6'	pieza	1.00	100%	0.31	0.31	
Barretilla de 8'	pieza	1.00	100%	0.34	0.34	
Barretilla de 10'	pieza	1.00	100%	0.38	0.38	
Barretilla de 12'	pieza	1.00	100%	0.38	0.38	
Tubo PVC 1 1/2 x 3.00 Mts.	uni	6.00	100%	0.95	5.68	
Disco de jebe	pieza	1.00	100%	0.05	0.05	
Taco de Arcilla	pieza	41.00	100%	0.05	2.16	
Ocre Polvo Rojo	kg	0.17	100%	2.63	0.44	
Escaleras telescopicas	pieza	1.00	100%	1.47	1.47	
Arco de sierra + hoja	pieza	1.00	100%	0.17	0.17	

D. Costo de implementos de seguridad

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.4 Implementos de Seguridad						**1.56**
Tareas sin ropa de agua	tareas	6.00	100%	0.59	3.57	
Tareas con ropa de agua	tareas	3.00	100%	0.63	1.90	

E. Costo de equipos en operación

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
1.5 Equipos en Operación						**91.63**
Jumbo 01 Brazo	Hm	2.82	100%	62.23	175.49	
Scooptram Epiroc S1D	Hm	2.80	100%	51.86	145.21	

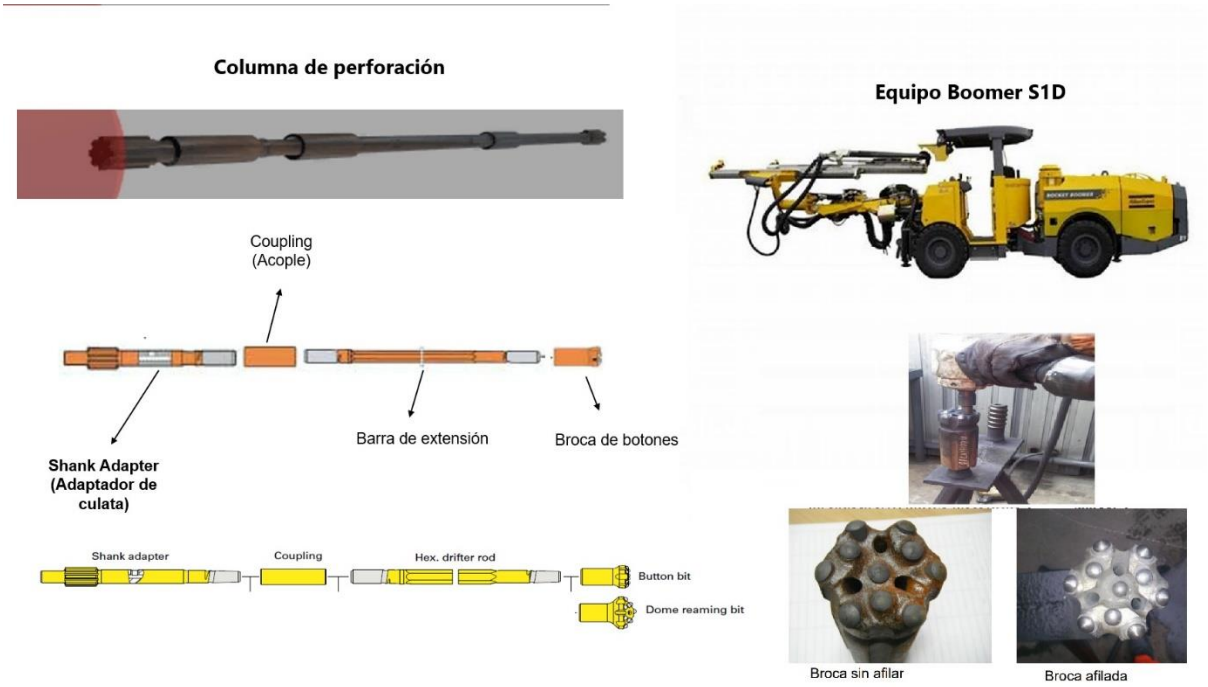
F. Costo de explosivos y accesorios voladura

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	INCIDENCIA	P.U. $. / Unid	Total $/.	Total $/. /MET.
(B)	**Explosivos y Acc. Voladura**						**72.10**
	EMULNOR 3000 1 1/2 X 12	kg	118.90	100%	1.44	171.34	
	EMULNOR 1000 1 1/2 X 12	kg	24.50	100%	1.04	25.51	
	FANELES MS	und	8.00	100%	0.88	7.03	
	FANELES LS	und	38.00	100%	0.88	33.38	
	CORDON DETONANTE 5P	unid	30.00	100%	0.29	8.70	
	CARMEX 7 pies	und	2.00	100%	0.88	1.76	
	MECHA RAPIDA	m	20.00	100%	0.23	4.63	
(C)	**Combustible**						**26.45**
	Petroleo Jumbo	Gln	4.23	100%	6.00	25.38	
	Petroleo Scoop	Gln	11.20	100%	6.00	67.20	
	COSTO TOTAL POR UNIDAD VALORIZADA (A+B+C)						417.28
	COSTO POR METRO LINEAL DE AVANCE ($/ml)						119.22

Tomada de Área de Operaciones Mina - UMSC

Anexo 4

Equipo de perforación Boomer S1D



Tomada de Epiroc S.A. (9)