

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Propuesta de evaluación geomecánica para mejorar
el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de
la veta 722, unidad minera San Cristóbal**

Jeferson Bartolome Moreno Blanco
Gustavo Rafael Orihuela Curisinche

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 : Jesús Fernando Martínez Ildelfonso
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 06 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:

PROPUESTA DE EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA MEJORAR EL DIMENSIONAMIENTO DEL TAJEO 75, DEL NIVEL 1220, DE LA VETA 722, UNIDAD MINERA SAN CRISTÓBAL

Autores:

1. Jeferson Bartolome Moreno Blanco – EAP Ingeniería de Minas
2. Gustavo Rafael Orihuela Curisínche– 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 16 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (10): SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

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

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

Atentamente,



Jesús Fernando Martínez Ildelfonso
Asesor de trabajo de investigación

ASESOR

Ing. Jesús Fernando Martínez Ildefonso

DEDICATORIA

Yo, Jeferson, dedico esta tesis a mis padres, por haberme apoyado en cada paso de mi carrera profesional. Gracias por la dedicación y el tiempo de alentarme a seguir adelante. Este logro es por ustedes, y siempre les estaré agradecido.

Yo, Gustavo, dedico esta tesis a mis padres y abuelos, por ser mi fuerza silenciosa, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo y la perseverancia. Gracias por su amor incondicional y por acompañarme, con paciencia y sabiduría, en cada etapa de este camino.

AGRADECIMIENTO

A la prestigiosa Universidad
Continental.

A la EAP de Ingeniería de
Minas

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ASESOR	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	xv
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	16
1.1 Planteamiento y formulación del problema	16
1.1.1 Planteamiento del problema	16
1.1.2 Formulación del problema.....	17
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Justificación e importancia.....	18
1.4 Hipótesis.....	19
1.4.1 Hipótesis general	19
1.4.2 Hipótesis específicas.....	19
1.5 Identificación de variables	19
1.5.1 Variable independiente	19
1.5.2 Variable dependiente	19
1.5.3 Matriz de operacionalización de variables.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes de la investigación	21
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	21
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	21
2.2. Generalidades de la Unidad Minera San Cristóbal	23
2.2.1 Ubicación y accesibilidad.....	23
2.2.2 Geología general.....	24
2.3. Bases teóricas	28
2.3.1 Propuesta de la evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.....	28

2.3.2 Metodología de la evaluación geomecánica en relación a la mejora del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.....	29
2.3.3 Cronología de trabajos para la mejora del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal	36
2.4. Definición de términos	41
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	44
3.1 Método y alcances de la investigación.....	44
3.1.1. Métodos de la investigación	44
3.2 Alcances de la investigación	44
3.3 Diseño de la investigación	45
3.4 Población y muestra	45
3.4.1 Población	45
3.4.2 Muestra	45
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	45
3.5.1 Técnicas utilizadas en la recolección de datos.....	45
3.5.2 Instrumentos utilizados en la recolección de datos.....	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1 Propuesta de evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.	46
4.2 Caracterización geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.....	47
4.2.1 Zonificación del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal	47
4.2.2 Estudio situacional del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal	49
4.3 Evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.....	53
4.3.1 Propuesta de mejora del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal	53
4.4 Prueba de hipótesis.....	67
4.4.1. Prueba de hipótesis general	67
4.4.2. Análisis de datos.....	67
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES.....	72

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
ANEXOS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.....	20
Tabla 2. Accesibilidad	23
Tabla 3. Resumen cronológico de los trabajos a realizar.....	40
Tabla 4. Parámetros geomecánicos evaluados del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722	48
Tabla 5. Interpretación de los resultados del RMR (tajeo 75, nivel 1220, veta 722).....	48
Tabla 6. Parámetros geomecánicos para el cálculo del índice de calidad "q" modificado del tajeo 75, nivel 1220, veta 722.....	58
Tabla 7. Parámetros geomecánicos para el cálculo del factor de ajuste "A" de esfuerzo en la roca del tajeo 75, nivel 1220, veta 722.....	58
Tabla 8. Comparación de los factores de seguridad del análisis situacional previo y posterior a las mejoras del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.....	68
Tabla 9. Estadísticas de muestras relacionadas.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación y vías de acceso	24
Figura 2. Plano geológico	25
Figura 3. Columna estratigráfica	26
Figura 4. Factor de esfuerzo en la roca, A	31
Figura 5. Factor Orientación de Juntas, B.....	32
Figura 6. .Factor de Ajuste Gravitatorio, C	33
Figura 7. Radio Hidráulico	34
Figura 8. TAS (tensión admisible de sostenimiento), Abaco de Bieniawski	35
Figura 9. TAS (tensión admisible de sostenimiento), Abaco de Bieniawski	36
Figura 10. Zonificación del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.....	47
Figura 11. Estudio situacional - Diseño del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.	50
Figura 12. Estudio situacional - Análisis situacional del factor de seguridad	51
Figura 13. Estudio situacional - Deformación que experimentará el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.	52
Figura 14. Propuesta de mejora del diseño del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal	55
Figura 15. Propuesta de mejora del factor de seguridad del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal	56
Figura 16. Propuesta de mejora - Deformación que experimentará el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal	57
Figura 17. Factor de esfuerzo en la roca, A.....	59
Figura 18. .Factor de ajuste gravitatorio C.....	61
Figura 19. Cuerpo mineralizado del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.....	63
Figura 20. Número de estabilidad (N) vs radio hidráulico (caja techo)	64
Figura 21. TAS (tensión admisible de sostenimiento), Abaco de Bieniawski	66

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo principal, desarrollar la propuesta de la evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75 del nivel 1220 veta 722, Unidad Minera San Cristóbal. Para ello, se empleó el método científico general, y el método específico utilizado fue el experimental-deductivo. La investigación fue de tipo aplicada, con un nivel descriptivo y un diseño experimental. La recopilación de datos se realizó para identificar y analizar las características geomecánicas del macizo rocoso en el tajeo 75. Se llevará a cabo una observación directa en el campo, registrando las condiciones geológicas, las propiedades del macizo rocoso y los posibles signos de inestabilidad como fisuras o fracturas, que puedan influir en el diseño del tajeo.

En el estudio situacional, el análisis del tajeo 75 evidencia un riesgo significativo de inestabilidad, con un factor de seguridad de 0.95, un número de estabilidad N de 0.89 y un tiempo de autoporte de solo 36 horas. El pilar de 5 metros no es suficiente para soportar las tensiones, y el flujo de agua, con un radio hidráulico de 5.7, debilita el macizo rocoso. Al rediseñar el pilar se debe incorporar refuerzos como cable bolting y realizar el relleno detrítico de manera oportuna, con el fin de asegurar la estabilidad estructural. La propuesta de mejora para el tajeo 75 indica que, aunque los factores de resistencia del terreno son adecuados (entre 1.06 y 1.26), se requiere monitoreo constante por las deformaciones internas de hasta 4.8 cm. Se propone rellenar cavidades en un máximo de 48 horas, usar un pilar de 7 metros para amortiguar tensiones y perforar a 20 cm de la caja techo para proteger la roca filita. Además, el análisis geomecánico revela una estabilidad moderada ($Q = 1.84$, $RMR = 49$, $N' = 2.5$), con un tiempo de autoporte de solo 2 días, lo que demanda instalación temprana de sostenimientos y relleno inmediato tras la voladura para prevenir fallas.

El diagnóstico preliminar mostró deficiencias en varios aspectos: el avance efectivo fue del 80 % con 1.2 m por disparo y 15.561 kg de explosivos, mientras que el estado óptimo alcanzó un avance de 2.0 m con una eficiencia del 90 %, utilizando 26.407 kg de explosivos. En cuanto a la fragmentación, el 80 % del material pasó por una malla de 8.21 pulgadas, lo que fue ineficiente, pero tras la optimización, este valor mejoró a 4.89 pulgadas, optimizando la eficiencia de los equipos de carguío y acarreo. Además, se identificaron deficiencias en los parámetros de perforación con Jackleg, con un avance del 1.22 m, que estuvo un 11 % por debajo del valor óptimo, mientras que, en el estado óptimo, los parámetros se acercaron a los ideales, con un avance de 2.00 m. Por último, en las pruebas de voladura, la eficiencia mejoró del 80 % al 90% , con un aumento en el volumen roto y tonelaje. Los costos de perforación y

voladura también se redujeron de \$621.30 a \$442.10 por metro lineal, reflejando una mejora significativa en la eficiencia operativa.

Palabras clave: propuesta de la evaluación geomecánica para el dimensionamiento del tajeo

ABSTRACT

This study aimed to develop a geomechanical evaluation proposal to improve the design of Tajeo 75, located at Level 1220, Vein 722, in the San Cristóbal Mining Unit. To achieve this, the general scientific method was employed, with the specific method being experimental-deductive. The research was applied in nature, with a descriptive level and an experimental design. Data collection was carried out to identify and analyze the geomechanical characteristics of the rock mass in Tajeo 75. Direct field observation was conducted, recording geological conditions, rock mass properties, and potential signs of instability, such as fissures or fractures, that may influence the stope design.

In the situational analysis, the analysis of stope 75 reveals a significant risk of instability, with a safety factor of 0.95, a stability number N of 0.89, and a self-supporting time of only 36 hours. The 5-meter pillar is insufficient to withstand the stresses, and the water flow, with a hydraulic radius of 5.7, weakens the rock mass. When redesigning the pillar, reinforcements such as cable bolting must be incorporated and detrital fill must be carried out in a timely manner to ensure structural stability. The improvement proposal for stope 75 indicates that, although the ground resistance factors are adequate (between 1.06 and 1.26), constant monitoring is required due to internal deformations of up to 4.8 cm. It is proposed to fill cavities within a maximum of 48 hours, use a 7-meter pillar to absorb stresses, and drill 20 cm from the roof box to protect the phyllite rock. Furthermore, geomechanical analysis reveals moderate stability ($Q = 1.84$, $RMR = 49$, $N' = 2.5$), with a self-support time of only 2 days, which requires early installation of supports and immediate backfill after blasting to prevent failures.

The preliminary assessment revealed deficiencies in several aspects: the effective advance was 80% with 1.2 m per blast and 15.561 kg of explosives, while the optimal condition reached an advance of 2.0 m with 90% efficiency using 26.407 kg of explosives. Regarding fragmentation, 80% of the material passed through an 8.21-inch mesh, which was inefficient, but after optimization, this improved to 4.89 inches, increasing the loading and hauling equipment efficiency. Additionally, deficiencies were identified in drilling parameters using Jackleg, with an advance of 1.22 m, 11% below the optimal value, while under optimal conditions, the parameters approached ideal levels, achieving 2.00 m of advance. Lastly, blasting test efficiency improved from 80% to 90%, with an increase in broken volume and tonnage. Drilling and blasting costs were also reduced from \$621.30 to \$442.10 per linear meter, reflecting a significant improvement in operational efficiency.

Keywords: Geomechanical evaluation proposal for stope design.

INTRODUCCIÓN

La geomecánica juega un papel fundamental en la optimización de los procesos mineros, especialmente en lo que respecta al dimensionamiento y diseño de los tajeos, que son cruciales para garantizar la estabilidad de las estructuras subterráneas y la seguridad operativa. En este contexto, la evaluación geomecánica del tajeo 75, del nivel 1220, correspondiente a la veta 722, de la Unidad Minera San Cristóbal, busca mejorar los métodos de dimensionamiento del tajeo, a fin de aumentar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados al soporte y la estabilidad del tajeo.

El tajeo 75 enfrenta varios desafíos geomecánicos debido a las características específicas del macizo rocoso en esa área, como la presencia de discontinuidades, la variabilidad en las propiedades mecánicas de las rocas y las tensiones residuales, factores que impactan directamente la integridad estructural del tajeo. Además, las condiciones de trabajo, como la profundidad y el acceso a la zona, requieren una evaluación detallada para ajustar el diseño y las dimensiones del tajeo según la información geomecánica disponible.

El propósito de esta propuesta es realizar una evaluación integral que permita identificar los factores geomecánicos que afectan la estabilidad del tajeo, y con esta información, ajustar el dimensionamiento actual para mejorar la seguridad, optimizar los recursos y reducir los riesgos operativos. Esta evaluación incluirá la recopilación de datos geotécnicos, el análisis de las características del macizo rocoso y la aplicación de modelos numéricos para simular las condiciones de estabilidad bajo diferentes escenarios de carga y estrés.

Con este enfoque, la Unidad Minera San Cristóbal podrá contar con una base sólida para realizar cambios en el diseño del tajeo que promuevan una minería más segura y eficiente.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, la geomecánica en minería subterránea es una disciplina fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras. Gracias al avance en el desarrollo de tecnologías y métodos de modelado, como las simulaciones numéricas avanzadas, se ha podido optimizar el diseño y la estabilidad de los tajeos. Los estudios geomecánicos se realizan para enfrentar los desafíos geotécnicos que presentan las minas subterráneas, sobre todo aquellas con complejidades geológicas como la variabilidad en la composición de las rocas y la presencia de discontinuidades. Los proyectos en la evaluación geomecánica tienen como objetivo maximizar la eficiencia operativa, al mismo tiempo que buscan reducir los costos de sostenimiento y minimizar los riesgos catastróficos, un objetivo común en grandes operaciones mineras en regiones como Australia, Canadá y Sudáfrica.

En Perú, la minería subterránea es una de las principales fuentes de recursos naturales, y la estabilidad de los tajeos es vital para asegurar la seguridad de las operaciones. Empresas como la Unidad Minera San Cristóbal se enfrentan a desafíos geomecánicos que requieren evaluaciones precisas para garantizar tanto la seguridad como la rentabilidad de las operaciones. En el país, la geomecánica ha cobrado gran relevancia debido a las complejas características geológicas, que incluyen fallas, fracturas y variabilidad en la composición de las rocas. El marco regulatorio peruano, que establece normas de seguridad y medioambientales para las actividades mineras, subraya la necesidad de incorporar una evaluación geomecánica detallada en el diseño de los tajeos, con el fin de reducir incidentes y proteger tanto a los trabajadores como a la infraestructura.

A nivel local, en la Unidad Minera San Cristóbal, la evaluación geomecánica del tajeo 75 en el nivel 1220 veta 722 tiene como objetivo mejorar el diseño y dimensionamiento de este tajeo en particular. El macizo rocoso presenta características geológicas complejas, como discontinuidades, zonas de compresibilidad variable y tensiones residuales que afectan la resistencia de la roca. Estas condiciones generan retos para la estabilidad de las excavaciones, lo que incrementa los costos de soporte y disminuye la eficiencia operativa. Esta evaluación se enfocará en caracterizar el macizo rocoso mediante la recopilación de datos geotécnicos, ensayos de laboratorio, medición de las propiedades mecánicas y el uso de modelos numéricos para simular las condiciones in situ.

La propuesta de una evaluación geomecánica permitirá identificar las áreas más frágiles con presencia de fallas y determinar los ajustes necesarios en el dimensionamiento del tajeo. Con base en los resultados obtenidos, se podrán implementar soluciones prácticas como el uso adecuado de soportes (mallas, pernos, etc.), técnicas de excavación optimizadas y refuerzos adicionales para garantizar la estabilidad y seguridad del tajeo. Esto, a su vez, redundará en una operación más eficiente, con menos costos adicionales, mayor producción mineral y mayor seguridad para los trabajadores.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cómo influye la propuesta de evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influye la caracterización geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal?
- ¿Cómo influye la evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar la propuesta de evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar la caracterización geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.
- Realizar la evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

1.3 Justificación e importancia

La caracterización geomecánica es un proceso fundamental para entender las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso en el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722. Este análisis incluirá la identificación y clasificación de los materiales presentes, tales como su resistencia a la compresión, módulos de elasticidad, cohesión, fricción interna y las características de discontinuidades como fracturas y fallas. Además, los resultados *in situ* permitirán obtener los parámetros adecuados que definan el comportamiento de las rocas bajo las condiciones de carga y excavación. Con esta información, se logrará un dimensionamiento más preciso de las excavaciones y los sistemas de soporte, optimizando la seguridad operativa y reduciendo los costos innecesarios de refuerzo.

La correcta caracterización geomecánica tiene un impacto directo en la estabilidad a largo plazo de la mina. Un conocimiento detallado del macizo rocoso permite anticipar comportamientos como deslizamientos o movimientos indeseados, lo cual es vital para prevenir posibles accidentes y pérdidas materiales. Además, permite ajustar el diseño de los tajeos, ajustando las dimensiones de la excavación y los sistemas de soporte a las características específicas del terreno, lo que se traduce en una operación más eficiente y menos costosa, manteniendo los estándares de seguridad.

El ábaco de Barton es una herramienta geomecánica fundamental para evaluar la estabilidad de las excavaciones subterráneas, basándose en el análisis de la relación entre la resistencia a la cizalladura de las rocas y las propiedades geomecánicas del terreno como la cohesión y el ángulo de fricción. En este contexto, la evaluación de los parámetros del ábaco de Barton permitirá obtener una estimación precisa de la estabilidad del tajeo 75 en el nivel 1220, proporcionando una base para mejorar el dimensionamiento de la excavación y optimizar los sistemas de soporte. La inclusión de parámetros como el RMR (rock mass rating), que considera la calidad del macizo rocoso, y el índice de la Q de Barton, que evalúa la interacción

entre las discontinuidades, permitirá diseñar tajeos más adecuados a las condiciones geotécnicas específicas de la zona.

La aplicación de este enfoque resulta crucial para mejorar la seguridad y la rentabilidad de las operaciones. A través de esta evaluación, se logrará un diseño más eficiente y seguro, optimizando los costos de materiales y la cantidad de refuerzo necesario, al mismo tiempo que se mantiene la estabilidad de la excavación durante toda la operación minera. Esta metodología, que integra las propiedades mecánicas del macizo rocoso con los parámetros de soporte, proporciona una base técnica sólida para la toma de decisiones, garantizando que el dimensionamiento del tajeo 75 sea lo más adecuado posible para minimizar riesgos y maximizar la eficiencia de la explotación.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La propuesta de evaluación geomecánica será factible y viable para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La caracterización geomecánica será factible para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.
- La evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton será factible para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

1.5 Identificación de variables

1.5.1 Variable independiente

Propuesta de evaluación geomecánica.

1.5.2 Variable dependiente

Mejorar el dimensionamiento del Tajeo.

1.5.3 Matriz de operacionalización de variables

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de medición
Variable independiente: Propuesta de evaluación geomecánica	Es un estudio técnico geomecánico que analiza el comportamiento del macizo rocoso, para identificar riesgos y optimizar el diseño de excavaciones y soportes, con el objetivo de mejorar la seguridad, eficiencia y rentabilidad, mitigando fallas estructurales.	Caracterización del macizo rocoso	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión • Índice de calidad de la roca (Q) • Resistencia a la tracción • Discontinuidades • Módulo de elasticidad • Índice de resistencia de la roca (RMR) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de laboratorio: • Formato de la ficha de mapeo geomecánico
Variable dependiente: Mejorar el dimensionamiento del tajeo	Consiste en ajustar las dimensiones de las excavaciones subterráneas, considerando las propiedades geomecánicas del terreno, para optimizar la seguridad, estabilidad y eficiencia operativa, reduciendo costos y riesgos en la minería o construcción..	<p>Parámetros del Ábaco de Barton</p> <p>Estabilidad estructural de la excavación</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de calidad de la roca (Q) • Factor de seguridad • Relación entre esfuerzo y resistencia • Cálculo de la resistencia del macizo • Selección de soportes • Análisis del comportamiento ante deformaciones (desplazamientos, asentamientos) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de compresión y corte en laboratorio • Cálculos basados en el método Q de Barton (hojas de cálculo, software especializado) • Software de simulación geotécnica (PHASE 0.2, FLAC3D, UDEC) • Instrumentos de monitoreo (piezómetros, extensómetros) • Análisis de estabilidad de la excavación

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

La tesis titulada: “*Modelamiento geoestadístico de la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)*”, tiene como resultado desarrollar un modelo predictivo para la clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989) en un macizo rocoso y cuantificar la incertidumbre mediante simulación geoestadística, utilizando dos enfoques. Aunque ambos enfoques presentaron errores mínimos y similares en cuanto a su capacidad predictiva, la simulación directa (enfoque 1) generó distribuciones más continuas y menos dispersas, mientras que el enfoque 2, basado en un modelo gaussiano discreto, ofreció resultados más detallados al desglosar cada variable subyacente del RMR, respetando su naturaleza discreta. Sin embargo, los resultados del enfoque 2 no mostraron una mejora significativa en la capacidad predictiva y requerían un esfuerzo de modelado mucho mayor. A pesar de las diferencias, ambos enfoques mostraron una baja variabilidad en los errores y un alto grado de precisión, con una diferencia menor a 1 entre las estimaciones (1).

2.1.2 Antecedentes nacionales

La tesis titulada: “*Evaluación geomecánica para determinar las dimensiones del tajeo 7013 nivel 4300 cuerpo M y pilar de seguridad aplicado a la explotación por subniveles en la empresa minera Los Quenuales S.A.*” tiene como resultado evaluar la influencia geomecánica de la masa rocosa en el diseño y dimensionamiento del tajeo y pilar de seguridad, aplicado a la explotación por subniveles en la Empresa Minera Los Quenuales S.A. El enfoque fue cuantitativo y no experimental, utilizando el gráfico de Mattews y Potvin para evaluar la estabilidad geomecánica del macizo rocoso. A través de este análisis, se obtuvo el índice Q' y los factores A, B y C, con valores del radio hidráulico para el tajo (6.5

en el lado norte y sur, 9.0 en caja piso y caja techo, y 6.4 en techo del tajeo). Se determinó que la dimensión del tajeo era de 35 metros de largo y 37 metros de altura, mientras que el valor del pilar de seguridad se calculó con el método de Pakalnis, obteniendo un pilar de 10 metros de altura y 8 metros de ancho. Como conclusión, se presentó una configuración final de 20 metros de ancho, 37 metros de altura y 35 metros de longitud para el tajeo TJ 7013 (2).

La tesis titulada: “*Dimensionamiento geomecánico en vetas angostas del tajeo Piloto en la Unidad Minera Antapite*” se desarrolló en la Unidad Minera Antapite, en la veta Zorro, entre los niveles 3240 y 3285, con el objetivo de realizar el dimensionamiento geomecánico del tajeo Piloto para asegurar su estabilidad y la de sus excavaciones asociadas, garantizando seguridad y eficiencia operativa. En la primera etapa, se caracterizó el macizo rocoso de la veta desde un punto de vista litológico y estructural, clasificándolo y zonificándolo geomecánicamente, con especial enfoque en la caja techo (dominio estructural III-B, RMR entre 41 y 50). Se estimaron las propiedades de resistencia del macizo, la presencia de agua subterránea y los esfuerzos in situ, calculando un esfuerzo vertical de 3.90 MPa. En la segunda etapa, se evaluaron las dimensiones del tajeo Piloto utilizando el método gráfico de estabilidad de Mathews, con distintas longitudes de tajeo y un modelamiento numérico mediante el método de elementos finitos (Software Phase2). Los resultados mostraron un strength factor (FS) promedio de 1.06 en la primera fase, 0.96 en la segunda fase, y 1.15 con relleno detrítico, lo que indica que el tajeo es físicamente estable bajo estas condiciones (3)

La tesis titulada: “*Evaluación del macizo rocoso aplicando el método gráfico de estabilidad para el dimensionamiento geomecánico de tajeos*” tiene como resultados calcular la evaluación geomecánica del macizo rocoso para el dimensionamiento de tajeos en la mina Yuraocsha 2021, utilizando el método gráfico de estabilidad. La hipótesis planteó que la evaluación del macizo rocoso mediante el número de estabilidad, influye en el dimensionamiento geomecánico de los tajeos. La muestra fue el nivel 50, bloque N° 1, galería principal de Yuraocsha. Como resultado, se determinó que, con dimensiones de 25 m de largo, 15 m de alto y un ancho de minado de 1.2 m, los radios hidráulicos de la caja techo y el techo del tajeo fueron de 4.69 y 0.57, respectivamente, y el número de estabilidad fue de 384.5, lo que confirma que la explotación del tajeo es estable (4).

La tesis titulada: “*Influencia del estudio geomecánico de la veta Ramal Techo Zona Este en la Optimización del Método de Minado, U.E.A. Ticlio*” tiene como resultado estandarizar el rendimiento de las brocas cónicas de perforación para reducir el costo productivo en el tajeo 6520, nivel 2760, de la Compañía Minera Poderosa S.A., empleando un diseño experimental y observación de datos durante enero y febrero de 2024. Con la implementación de mejoras,

se alcanzó un avance efectivo de 1.48 metros, un tonelaje por disparo de 55.11 toneladas y una reducción del costo por tonelada a \$46.03, logrando una optimización por disparo de \$10.78/t, un incremento de producción de 11.57 toneladas y un ahorro mensual total de \$7,481.08 (5).

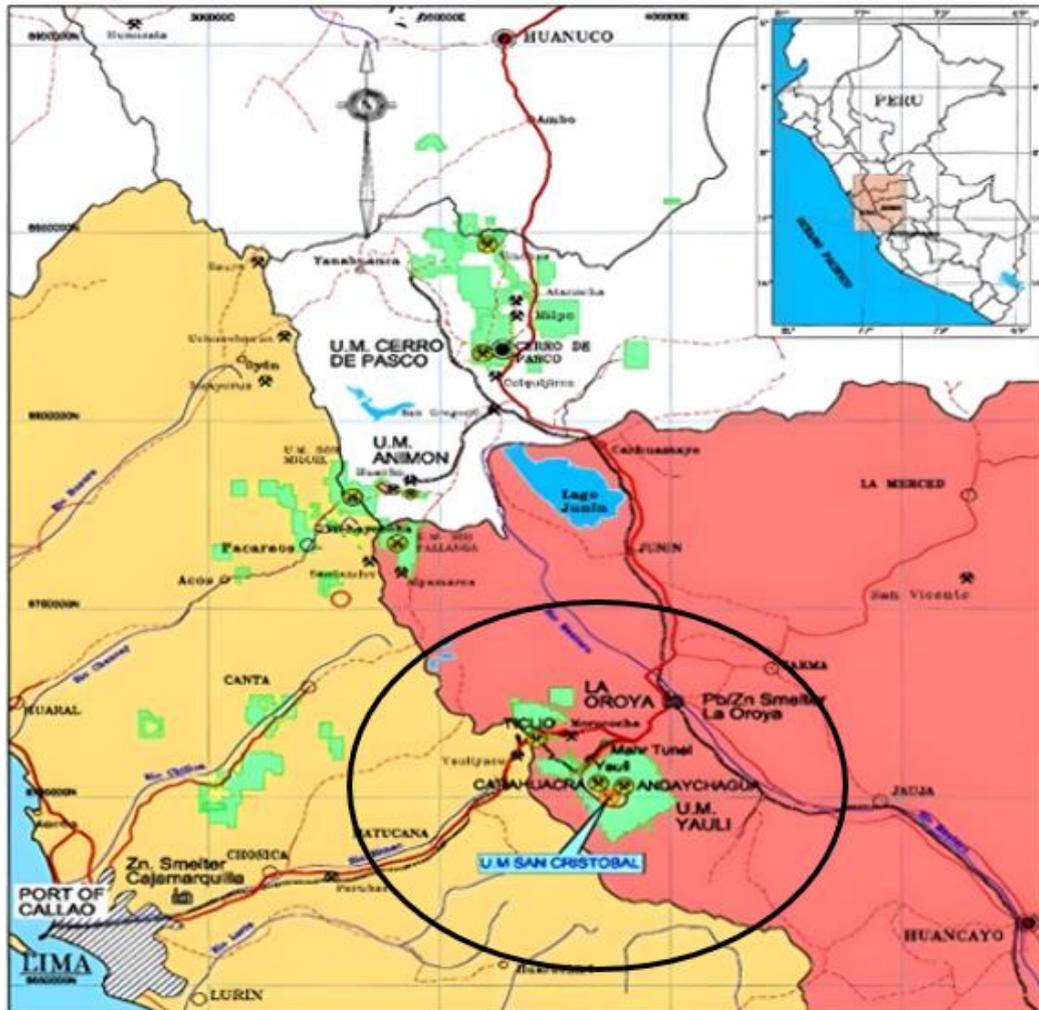
2.2. Generalidades de la Unidad Minera San Cristóbal

2.2.1 Ubicación y accesibilidad

La Unidad Minera San Cristóbal está ubicada en el distrito de Yauli, provincia de Yauli, y 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	



*Figura 1. Ubicación y vías de acceso
Tomada del Área de Geología de la Unidad Minera San Cristóbal (6)*

2.2.2 Geología general

a) Geología regional

El distrito minero de San Cristóbal forma parte del complejo domal de Yauli, lo que permite el acceso a formaciones geológicas del Paleozoico, como los grupos Excelsior y Mitu (6).

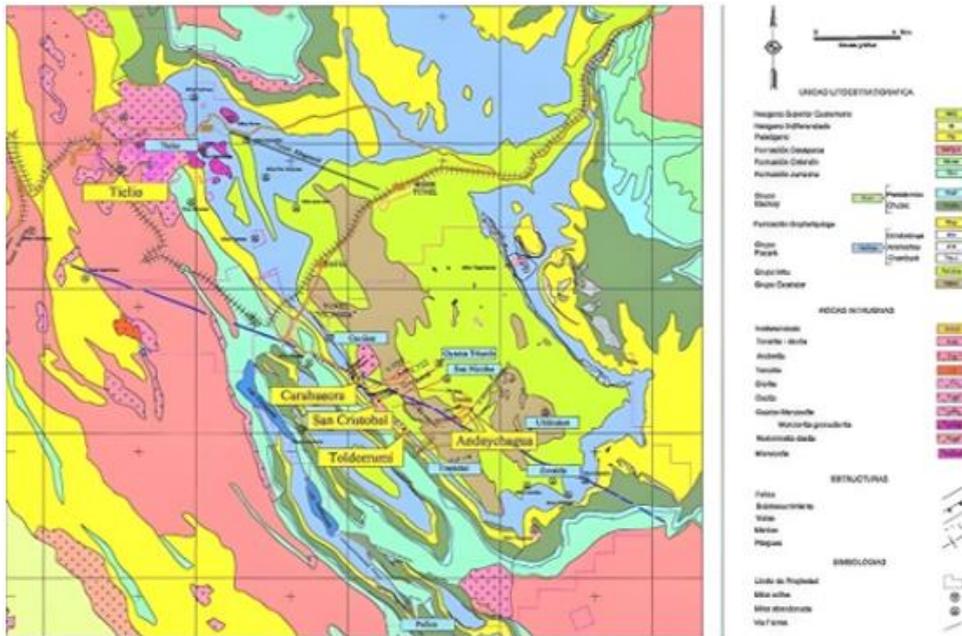


Figura 2. Plano geológico
Tomada del Área de Geología de la Unidad Minera San Cristóbal (6)

b) Geología local

- **Secuencia litológica**

La secuencia litológica en la Unidad Minera San Cristóbal abarca una amplia gama de formaciones geológicas, que van desde el Paleozoico hasta el Cretácico superior, tal como se detalla a continuación:

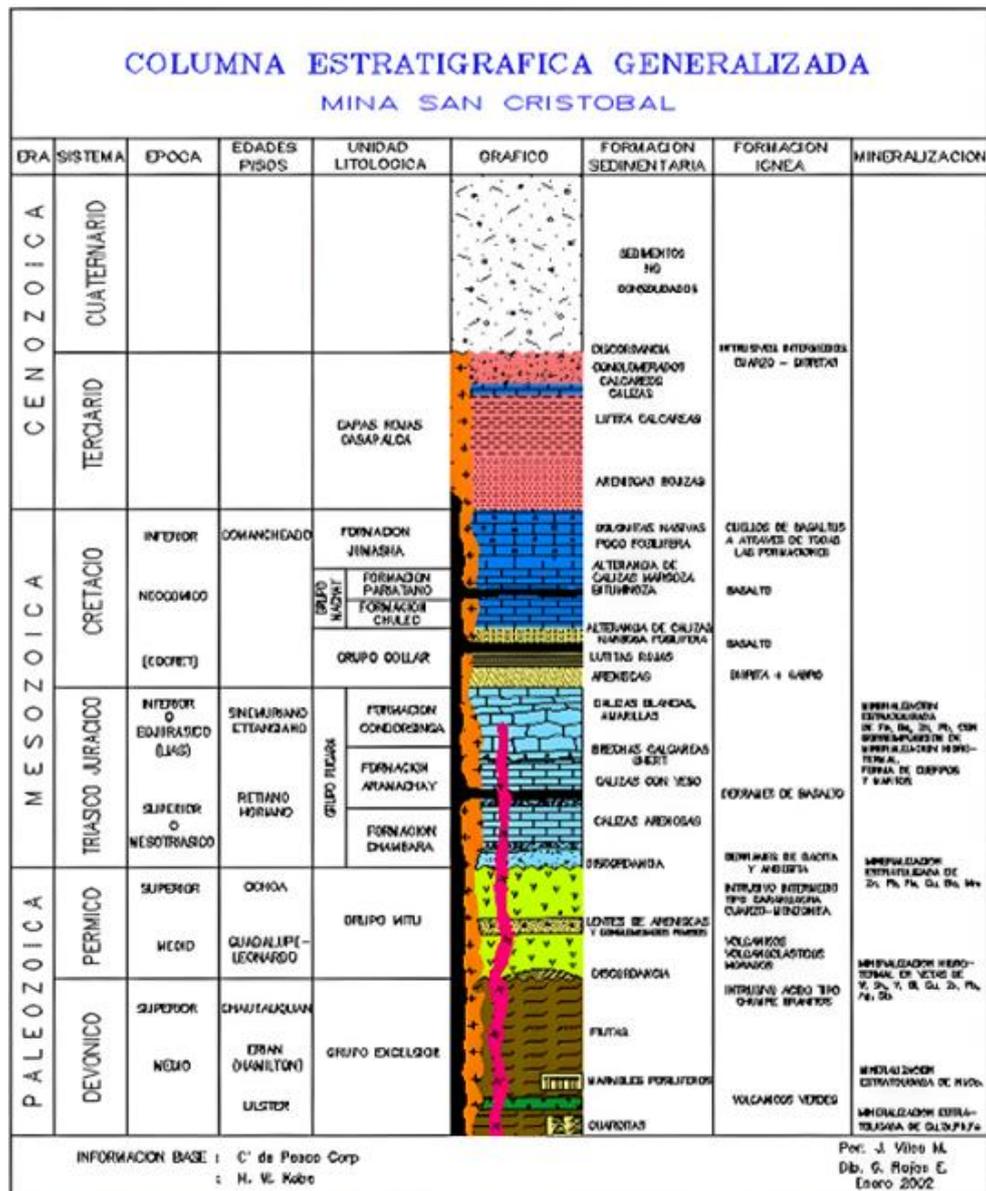


Figura 3. Columna estratigráfica
Tomada del Área de Geología de la Unidad Minera San Cristóbal (6)

- La secuencia litológica incluye las siguientes unidades geológicas:
- Silúrico-Devónico (Grupo Excelsior): formada por filitas, cuarcitas, rocas volcánicas verdosas y calizas marmolizadas, que contienen vetas mineralizadas con diversos metales. Esta unidad tiene un espesor de 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. Su espesor es de aproximadamente 800 metros.

- Triásico superior-liásico (Grupo Pucará): Compuesta 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 cercano a los 100 metros.
- Cretácico medio (Grupo Machay): Contiene calizas, margas y carbonatos dolomíticos, con espesores variables, y se destacan los fósiles de amonites en la región.

c) Geología estructural

La mina San Cristóbal se encuentra en el flanco occidental del domo de Yauli, que tiene una estructura asimétrica con inclinaciones entre 30° y 40° en el flanco este, y entre 60° y 80° en el flanco oeste. Destacan los anticlinales Chumpe y Yauli, siendo el primero el más importante, con un buzamiento de 55° hacia el suroeste y 30° hacia el noreste. El sistema de fracturación en la mina Carahuacra está relacionado con las fuerzas compresivas del domo de Yauli, que formaron el anticlinal de Chumpe durante el Cretácico. Posteriormente, en el plegamiento Incaico, las calizas se deslizaron sobre las rocas volcánicas y, durante el plegamiento "Quechua", ocurrió un proceso de mineralización, formando vetas, mantos y cuerpos minerales en las calizas del Grupo Pucará. Las vetas se generaron por el relleno de fracturas y los cuerpos minerales por la intersección de vetas y mantos (6).

d) Geología económica

Después del plegamiento "Quechua", la región vivió una fase de mineralización, donde soluciones mineralizantes originadas por stocks de monzonita cuarcífera formaron vetas, mantos y cuerpos minerales. Las vetas se crearon por el relleno de fracturas, especialmente en fracturas de tensión, siendo comunes en los volcanes del Grupo Mitu. Los mantos se desarrollaron en el flanco occidental del anticlinal, dentro de las calizas del Grupo Pucará, en contacto con rocas volcánicas del Grupo Mitu. Los cuerpos minerales se formaron por la intersección de vetas con mantos o por la combinación de varios mantos mineralizados (6).

2.3. Bases teóricas

2.3.1 Propuesta de la evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

La evaluación geomecánica tiene como propósito principal mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, en la veta 722, con el objetivo de asegurar la estabilidad de las excavaciones. Además, se busca optimizar las condiciones operativas, de seguridad y económicas en la Unidad Minera San Cristóbal, garantizando una operación más eficiente y prolongada en el tiempo.

Para lograr este objetivo, se llevará a cabo una serie de actividades detalladas que se dividen en varias fases clave. En primer lugar, se realizará una recolección de datos geológicos y geomecánicos que incluirá la revisión de mapas geológicos, análisis de reportes previos y la obtención de datos de perforaciones en la zona del tajeo. Además, se realizarán ensayos geomecánicos en laboratorio para medir la resistencia y las propiedades de las rocas. También se implementará un monitoreo geomecánico in situ, utilizando instrumentos como inclinómetros y extensómetros para registrar desplazamientos y tensiones en tiempo real.

El siguiente paso será el análisis geomecánico, en el que se utilizarán sistemas como RMR (Rock Mass Rating) y Q-system para clasificar la calidad del macizo rocoso, además de realizar estudios sobre las fracturas presentes, su orientación y cómo estas afectan la estabilidad del tajeo. A partir de los datos obtenidos, se determinarán los parámetros de resistencia y deformabilidad de la roca.

Posteriormente, se llevará a cabo una modelización numérica mediante simulaciones de estabilidad utilizando programas como PHASE, LAC3D o RS2, lo que permitirá predecir el comportamiento del macizo rocoso bajo las condiciones de excavación del tajeo. A partir de esta modelización, se evaluarán las tensiones internas y las posibles deformaciones del terreno, así como la respuesta frente a cargas dinámicas generadas por la maquinaria operativa y las voladuras.

El dimensionamiento del tajeo será optimizado en función de los resultados obtenidos en los análisis anteriores. Esto incluirá ajustes en las dimensiones del tajeo, como el ancho, la altura y el largo, buscando siempre maximizar tanto la seguridad como la productividad. Además, se diseñarán sistemas de soporte adecuados para las excavaciones, como pernos de anclaje y mallas metálicas, tomando en cuenta la calidad del macizo rocoso. También se ajustará la orientación y la inclinación de las paredes del tajeo, para reducir los riesgos de inestabilidad.

El plan de monitoreo continuo consistirá en la instalación de instrumentos para medir desplazamientos y deformaciones a lo largo de la vida útil del tajeo, garantizando un control constante de la estabilidad. Este monitoreo permitirá detectar cualquier anomalía y ajustar las operaciones según sea necesario.

Finalmente, se realizará una evaluación de los riesgos geomecánicos asociados al tajeo 75, tales como deslizamientos o colapsos y se propondrán medidas de mitigación que podrían incluir modificaciones en las técnicas de voladura, ajustes en el diseño del tajeo o el uso de soporte adicional. Además, se establecerán procedimientos operacionales para reducir los riesgos durante las fases de perforación y voladura.

El proceso de evaluación geomecánica se desarrollará en un cronograma de seis meses. En los primeros dos meses, se llevará a cabo la recolección de datos geológicos y geomecánicos, junto con las perforaciones in situ. Durante el tercer mes, se realizará el análisis y la clasificación geomecánica del macizo rocoso. En el cuarto mes, se procederá con las simulaciones numéricas y la evaluación de las tensiones internas. En el quinto mes, se optimizarán las dimensiones y el diseño del tajeo. Finalmente, en el sexto mes, se implementará el plan de monitoreo continuo y seguridad, y se dará inicio a la evaluación de riesgos.

La implementación de esta evaluación geomecánica permitirá mejorar significativamente el dimensionamiento del tajeo 75, aumentando la seguridad operativa y garantizando un entorno de trabajo más estable. Esto se traducirá en una reducción de costos operativos al disminuir los riesgos de colapsos y fallas geomecánicas. Además, se extenderá la vida útil del tajeo 75, optimizando la explotación de la veta 722. Asimismo, se incrementará la productividad mediante una operación más eficiente y bien planificada, lo que redundará en beneficios económicos para la Unidad Minera San Cristóbal.

2.3.2 Metodología de la evaluación geomecánica en relación a la mejora del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

El propósito de esta propuesta es llevar a cabo una evaluación geomecánica detallada que optimice el dimensionamiento de las excavaciones en el tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, en la Unidad Minera San Cristóbal. Esta evaluación es crucial para mejorar la estabilidad de las excavaciones, garantizar la seguridad de las operaciones y reducir los riesgos asociados a posibles fallas o deslizamientos en las excavaciones. A través de este análisis, se busca

encontrar las mejores condiciones para el sostenimiento de las paredes del tajeo y la excavación eficiente de la veta.

- **Índice de calidad "Q" modificado**

El índice "Q" modificado es una herramienta fundamental para evaluar la calidad del macizo rocoso. Este índice permite determinar la capacidad de la roca para soportar las excavaciones sin presentar inestabilidad, tomando en cuenta factores como la resistencia de la roca, las discontinuidades presentes y la posible presencia de agua. Un valor elevado del índice "Q" indica una roca de mejor calidad, lo que permite realizar excavaciones más amplias y seguras (7).

Fórmula del índice "Q" modificado:

$$Q = \frac{RQD \cdot J_n \cdot J_r \cdot J_w}{J_r \cdot J_w}$$

Donde:

- RQD: Rock Quality Designation, que mide la calidad de la roca.
- J_n: Factor de discontinuidad (evalúa la cantidad de fracturas en la roca).
- J_r Factor de rugosidad de las discontinuidades.
- J_w: Factor de agua (indica si la masa rocosa tiene presencia de agua).

- **Cálculo del factor de ajuste "A" de esfuerzo en la roca**

El cálculo del factor de esfuerzo "A" se realizó utilizando los valores de resistencia a la compresión uniaxial de la roca y el esfuerzo máximo inducido en el macizo rocoso (7), tal como se detalla a continuación.

$$A = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{eff}}$$

Donde:

- σ_{max} : Esfuerzo máximo generado por la excavación.
- σ_{eff} : Esfuerzo efectivo (resistencia de la roca a la fractura).

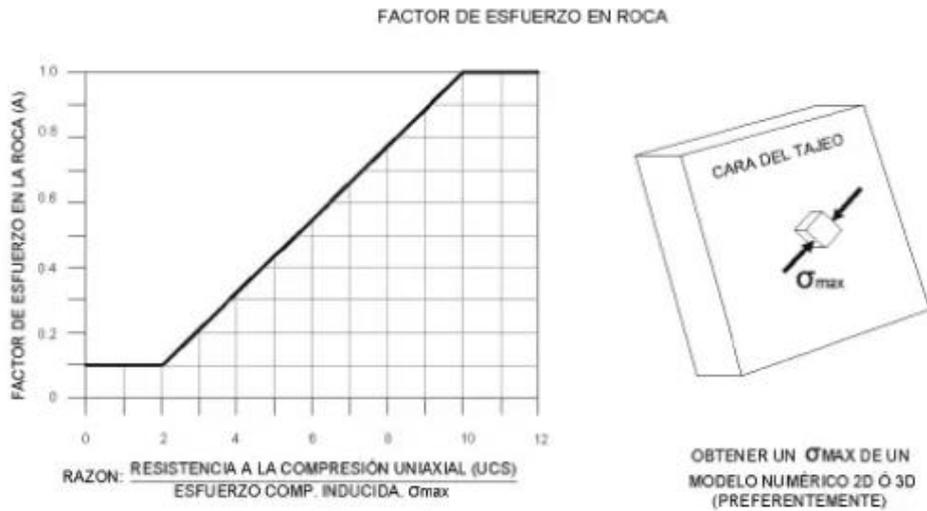


Figura 4. Factor de esfuerzo en la roca, A
Tomada de la Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas, Osinergmin (8)

- **Cálculo del factor de ajuste "B" por orientación de discontinuidades**

Las discontinuidades en la roca, como fallas o fracturas, pueden afectar la estabilidad de la excavación dependiendo de su orientación. El Factor "B" ajusta el riesgo de inestabilidad debido a la orientación de estas discontinuidades en relación al plano de excavación (7).

Fórmula de B:

$$B = \cos (\theta)$$

Donde:

θ : Ángulo de inclinación de la discontinuidad respecto al plano de excavación.



Figura 5. Factor Orientación de Juntas, B
Tomada de la Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas, Osinergmin (8)

- **Cálculo del factor de ajuste "C" para caídas por gravedad**

El factor "C" evalúa el comportamiento de la roca frente a caídas de material debidas a la gravedad o el lajamiento. Este ajuste es necesario cuando las excavaciones tienen paredes altas o la roca es inestable (7).

Fórmula de C:

$$C = 8 - 6 \times \cos(\theta)$$

Donde:

θ : Ángulo de inclinación de la discontinuidad respecto al plano de excavación.

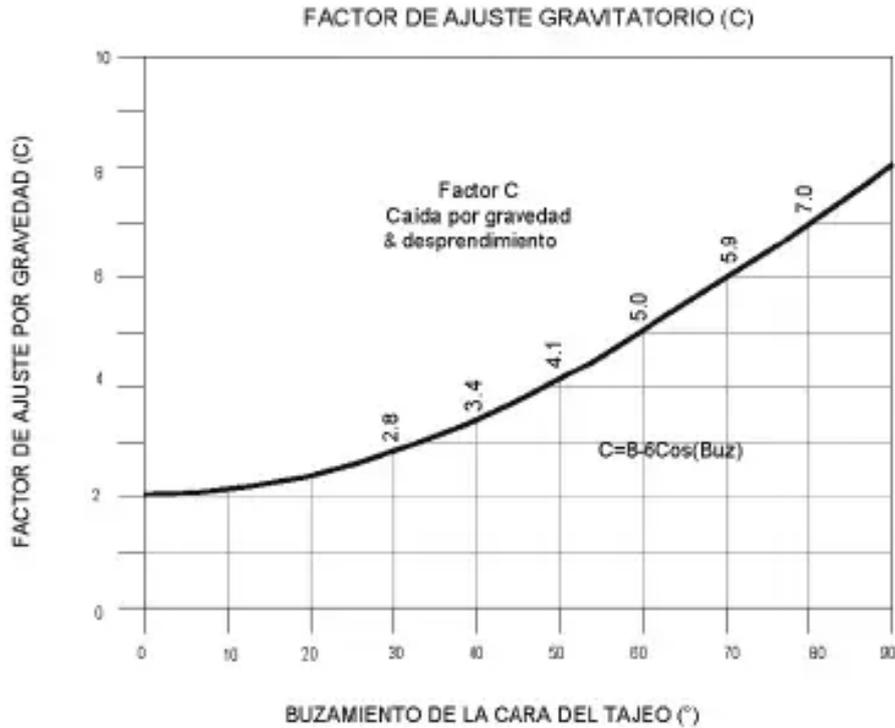


Figura 6. .Factor de Ajuste Gravitatorio, C
Tomada de la Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas, Osinergmin (8)

- **Cálculo del número de estabilidad N'**

El número de estabilidad N', es un parámetro que combina todos los factores anteriores para indicar la estabilidad general de la excavación. Un valor mayor de N', sugiere una mayor estabilidad (7).

Fórmula de N':

$$N' = Q \cdot A \cdot B \cdot C$$

Donde:

- Q: Índice de calidad de la roca
- A: Factor de ajuste por esfuerzo
- B: Factor de ajuste por discontinuidades
- C: Factor de ajuste por caídas

- **Cálculo del radio hidráulico S**

Es una relación geométrica que expresa la forma de una excavación, usada para evaluar su estabilidad en conjunto con el número de estabilidad (N), como parte del método de Mathews (7).

Fórmula de S:

$$S = \frac{A \text{ (area m}^2\text{)}}{P \text{ (perimetro m)}}$$

Donde:

- A: Área expuesta de la excavación (cara libre del tajo), en m²
- P: Perímetro expuesto al vacío o libre, en metros
- S: Radio hidráulico, en metros

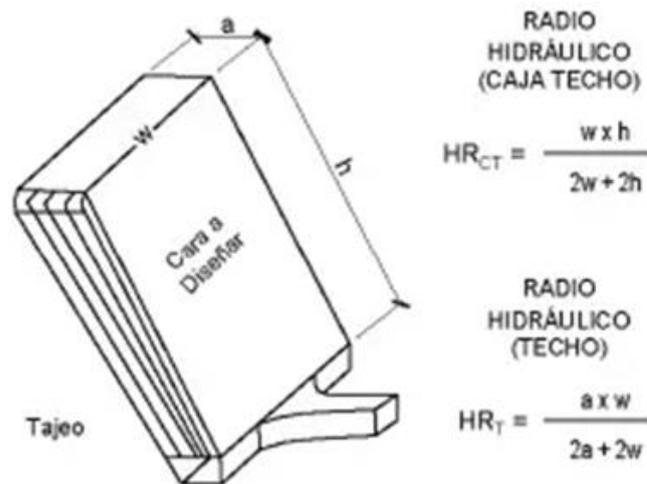


Figura 7. Radio Hidráulico

Tomada de la Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas, Osinergmin (8)

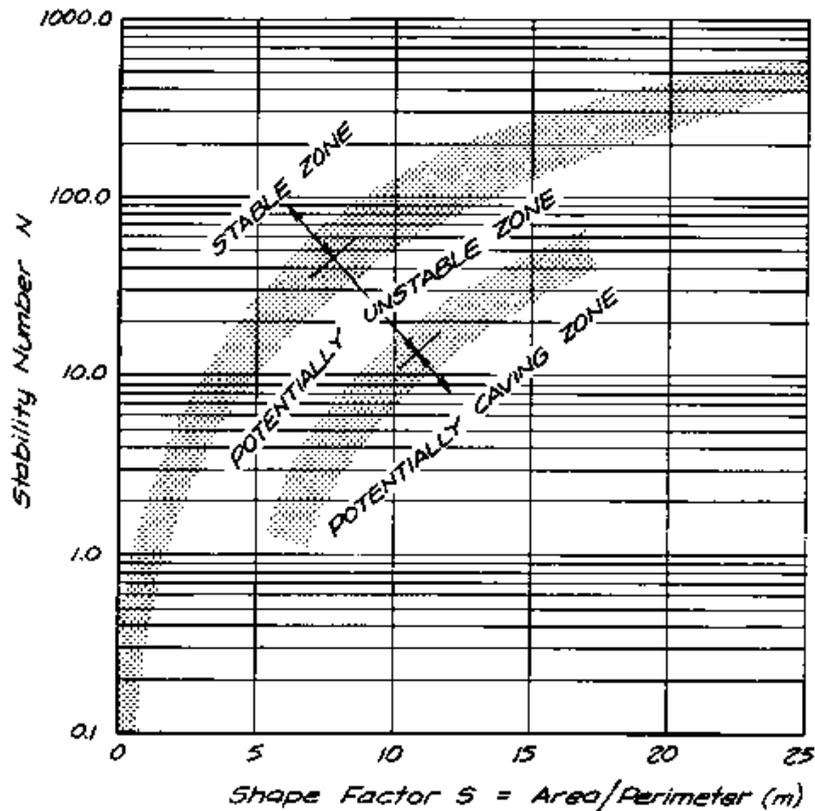


Figura 8. TAS (tensión admisible de sostenimiento), Abaco de Bieniawski
 Tomada de Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 m in hard rock
 (9)

- **Cálculo de la abertura máxima**

El cálculo de la abertura máxima permite determinar el ancho máximo (w) que puede tener un tajo subterráneo (open stope) para garantizar su estabilidad geotécnica, en función de la altura del tajo (H) y el radio hidráulico crítico (S), definido según la calidad del macizo rocoso y el método de Mathews.

Este valor de abertura es fundamental en el diseño minero subterráneo, ya que define la dimensión límite que puede excavar sin comprometer la integridad de las paredes ni generar colapsos (7).

La fórmula de abertura máxima es la siguiente:

$$W = \frac{H - 2 * H * S}{(H - 2 * S)}$$

Donde:

- W: Abertura máxima o span (m)
- H: Altura del tajo (m)
- S: Radio hidráulico objetivo (m)

- **Cálculo de TAS (tensión admisible de sostenimiento)**

El tiempo de autosoprote (TAS), es el tiempo que una excavación subterránea (como un tajo, galería o cámara) puede mantenerse estable sin sostenimiento, antes de que se presenten fallas o desprendimientos significativos. Este cálculo es clave para decidir cuándo instalar soporte geomecánico (como pernos, mallas, shotcrete, etc.).

Para calcular el TAS, se utiliza el Abaco de Bieniawski, que relaciona dos variables:

- La calidad del macizo rocoso (RMR)
- La abertura o SPAN de la excavación (en metros)

Con estos datos, se consulta el Gráfico de LMA (límite máximo de autosoprote) y se obtiene el valor de TAS en días.

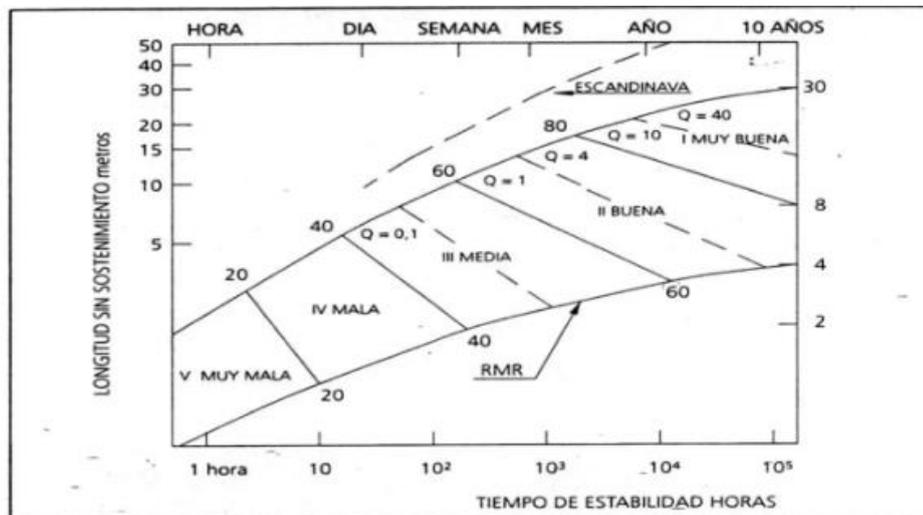


Figura 9. TAS (tensión admisible de sostenimiento), Abaco de Bieniawski Tomada de Engineering Rock Mass Classifications (10)

2.3.3 Cronología de trabajos para la mejora del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

La evaluación geomecánica para el tajeo 75 en la Unidad Minera San Cristóbal se organiza de forma cronológica en diversas fases que aseguran una evaluación exhaustiva y detallada de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, optimizando el diseño y las medidas de seguridad de las excavaciones. La metodología aquí presentada abarca desde la recolección de datos hasta la implementación de sistemas de monitoreo y evaluación de riesgos, garantizando una operación segura y eficiente (10).

A continuación, se detallan las fases del proceso:

a) Fase A: Recolección de datos geológicos y geomecánicos

La primera fase de la evaluación tiene como objetivo recolectar los datos básicos necesarios para realizar una caracterización preliminar del área de trabajo. Esta fase es fundamental para obtener una visión clara de las condiciones geológicas y geomecánicas del Tajeo 75, y se desarrolla en tres subfases clave:

- **Estudio geológico y geomecánico**

Revisión de mapas geológicos y perforaciones previas: en este primer paso, se realiza una revisión exhaustiva de los mapas geológicos previos y de los informes de perforación en la zona del Tajeo 75. Esto permite obtener información sobre la geología regional y la posible existencia de fallas, fracturas o estructuras geológicas que puedan afectar la estabilidad de la excavación. La interpretación precisa de estos datos será clave para una planificación adecuada del tajeo (10).

Interpretación de litologías, fallas y fracturas: es esencial entender la composición litológica del área, así como la presencia de fracturas y fallas. Esto determina la resistencia de la roca y la posibilidad de inestabilidad durante las excavaciones.

Obtención de muestras representativas de la roca: Se llevará a cabo una campaña de perforación para extraer muestras representativas de la roca en el tajeo 75. Estas muestras se utilizarán en los ensayos geomecánicos posteriores para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la roca.

- **Ensayos de laboratorio**

Resistencia a la compresión y fricción interna: se realizarán ensayos de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión de las muestras de roca, tanto en condiciones simples como triaxiales. Además, se llevarán a cabo pruebas de fricción interna, que permiten evaluar la cohesión y la fricción de las superficies de las rocas bajo presión. Estos ensayos proporcionan parámetros fundamentales para el diseño de la excavación (10).

Módulo de elasticidad: se medirá el módulo de elasticidad, que describe la capacidad de la roca para deformarse bajo cargas. Este parámetro es esencial para comprender cómo la roca responderá a las tensiones generadas durante la excavación.

- **Monitoreo geomecánico in situ**

Instalación de dispositivos de medición: para obtener información precisa sobre los desplazamientos, tensiones y deformaciones en las paredes del tajeo, se instalarán dispositivos como inclinómetros, extensómetros y piezómetros. Estos instrumentos permitirán realizar un seguimiento en tiempo real de las condiciones del macizo rocoso durante el proceso de excavación (10).

b) Fase B: Análisis geomecánico

Una vez que se han recopilado los datos iniciales, la siguiente fase se centra en analizar la información obtenida y caracterizar la calidad geomecánica del macizo rocoso. Esto incluye la identificación de fracturas críticas, la determinación de los parámetros geomecánicos y la evaluación de la viabilidad de las excavaciones.

- **Clasificación geomecánica del macizo rocoso**

Aplicación de sistemas RMR y Q-system: para clasificar el macizo rocoso y obtener una evaluación preliminar de su calidad, se emplearán los sistemas de clasificación RMR (Rock Mass Rating) y Q-system. Estos sistemas permiten calcular un índice que determina la estabilidad y calidad de la roca, proporcionando una base sólida para el diseño de la excavación (10).

- **Estudio de fracturación**

Análisis de fracturas: se realizará un estudio detallado de la densidad, orientación y tipo de fracturas presentes en el macizo rocoso. Este análisis es crucial, ya que las fracturas pueden afectar la estabilidad de las paredes del tajeo, provocando desprendimientos o deslizamientos durante la excavación (10)

- **Determinación de parámetros geomecánicos**

Parámetros de resistencia y deformabilidad: utilizando los resultados de los ensayos de laboratorio y los datos de fracturamiento, se estimarán los parámetros geomecánicos necesarios para el diseño de la excavación. Estos incluyen la cohesión, el ángulo de fricción interna y el módulo de elasticidad, los cuales influirán en la evaluación de la estabilidad del tajeo.

c) Fase C: Modelización numérica

En esta fase se utilizarán modelos numéricos avanzados para simular el comportamiento del macizo rocoso durante la excavación y evaluar la estabilidad del Tajeo 75. Esta etapa permite prever posibles problemas y realizar ajustes en el diseño de la excavación.

- **Simulación de estabilidad**

Modelos numéricos (FLAC3D, RS2): se llevarán a cabo simulaciones utilizando software especializado como FLAC3D o RS2. Estos modelos simulan el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones de excavación, permitiendo identificar zonas potencialmente inestables y optimizar el diseño del tajeo (11).

- **Evaluación de tensiones**

Cálculo de tensiones internas y deformaciones: A través de la modelización numérica, se evaluarán las tensiones internas en el macizo rocoso. Se identificarán las zonas críticas donde las tensiones pueden ser excesivas, lo que podría llevar a la inestabilidad de las paredes del tajeo.

- **Análisis de cargas dinámicas**

Impacto de las voladuras y maquinaria: Las simulaciones también considerarán el impacto de las cargas dinámicas generadas por las voladuras y la maquinaria operativa. Esto permitirá prever posibles afectaciones a la estabilidad del tajeo, especialmente en las zonas más vulnerables (11).

d) Fase D: Optimización del dimensionamiento del tajeo

En esta fase se optimizarán las dimensiones del tajeo 75 y se diseñarán los sistemas de soporte adecuados para garantizar la estabilidad de las excavaciones.

- **Ajuste de dimensiones del tajeo**

Optimización de las dimensiones: con base en los resultados obtenidos en las fases anteriores, se ajustarán las dimensiones del tajeo, tales como el ancho, la altura y la longitud, para mejorar la seguridad y la eficiencia operativa. Este ajuste busca reducir el riesgo de inestabilidad y aumentar la capacidad de carga de las paredes del tajeo (11).

- **Diseño de soportes**

Selección de sistemas de soporte: se diseñarán sistemas de soporte adecuados para las condiciones específicas del Tajeo 75. Esto podría incluir pernos de anclaje, mallas metálicas u otros tipos de soportes para asegurar la estabilidad de las paredes del tajeo durante la operación.

- **Optimización de la orientación y geometría**

Ajuste de la inclinación y orientación: con base en la información sobre las fracturas y la tectónica local, se ajustará la inclinación y orientación de las paredes del tajeo. El objetivo es

reducir los riesgos de deslizamientos o colapsos, lo cual es fundamental para mantener la estabilidad a largo plazo (11).

e) Fase E: Implementación de monitoreo y evaluación de riesgos

La última fase se centra en la implementación de sistemas de monitoreo continuos y la evaluación de los riesgos geomecánicos a lo largo de la vida útil del tajeo. Esto permitirá una intervención temprana en caso de que surjan problemas de estabilidad.

- **Instalación de sistemas de monitoreo continuo**

Monitoreo en tiempo real: se instalarán sistemas de monitoreo continuo que permitirán detectar desplazamientos y deformaciones en las paredes del tajeo en tiempo real. Estos sistemas son fundamentales para garantizar una intervención rápida ante cualquier señal de inestabilidad (12).

- **Monitoreo post-excavación**

Seguimiento de la estabilidad: una vez que el tajeo esté en operación, se continuará con el monitoreo para garantizar que la estabilidad se mantenga a lo largo del tiempo.

- **Evaluación de riesgos geomecánicos**

Identificación y mitigación de riesgos: se evaluarán los riesgos geomecánicos, tales como deslizamientos, fallas o colapsos. Se diseñarán medidas de mitigación que reduzcan estos riesgos y aseguren la seguridad operativa (12).

- **Definición de procedimientos operativos**

Procedimientos para reducir riesgos: Finalmente, se establecerán procedimientos operativos que minimicen los riesgos durante las fases de perforación, voladura y extracción, lo que garantiza que las operaciones sean lo más seguras posible (12)..

Tabla 3. Resumen cronológico de los trabajos a realizar

Fase	Actividades clave
Fase A: Recolección de datos	Revisión geológica, perforaciones, ensayos, monitoreo
Fase B: Análisis geomecánico	Clasificación, estudio de fracturas, parámetros geomecánicos

Fase C: Modelización numérica	Simulaciones de estabilidad, evaluación de tensiones
Fase D: Optimización del tajeo	Ajuste de dimensiones, diseño de soportes, orientación
Fase E: Implementación de monitoreo y evaluación de riesgos	Monitoreo, evaluación de riesgos, procedimientos operativos

Tomada de Handbook de geomecánica para la pequeña minería y la minería artesanal de Chile (12)

El proceso metodológico propuesto para la evaluación geomecánica del tajeo 75 sigue un enfoque cronológico que asegura una evaluación integral y sistemática de todas las variables críticas que afectan la estabilidad de las excavaciones. Esta metodología permite optimizar el diseño del tajeo, implementar un monitoreo continuo, identificar posibles riesgos geomecánicos y establecer procedimientos operativos que maximicen la seguridad y la eficiencia en la Unidad Minera San Cristóbal. Al seguir esta estructura, se logra una operación minera más segura y rentable.

2.4. Definición de términos

- Índice de calidad "Q" modificado: es una herramienta utilizada para evaluar la calidad del macizo rocoso en función de la resistencia, las discontinuidades y la presencia de agua. Un índice alto sugiere una roca más estable para las excavaciones (11).
- RQD (Rock quality designation): es un parámetro que mide la calidad de la roca basado en el porcentaje de longitudes de los núcleos de perforación que están libres de fracturas o discontinuidades (11).
- Jn (Factor de discontinuidad): evalúa la cantidad y la severidad de las fracturas o discontinuidades presentes en la roca. A mayor número de discontinuidades, mayor riesgo de inestabilidad (11).
- Jr (Factor de rugosidad de las discontinuidades): este factor evalúa la rugosidad de las superficies de discontinuidad. A mayor rugosidad, mayor fricción entre las superficies, lo que puede aumentar la estabilidad (11).

- J_w (Factor de agua): indica la presencia de agua en el macizo rocoso. La presencia de agua puede disminuir la estabilidad de las excavaciones al generar presión adicional (11).
- S (Factor de esfuerzo): representa la resistencia de la roca frente a los esfuerzos o tensiones aplicadas durante la excavación. Este factor ayuda a determinar si la roca es capaz de resistir las tensiones sin fracturarse (11).
- Esfuerzo en la roca: un factor que ajusta las tensiones que actúan sobre la roca durante la excavación, considerando la capacidad de la roca para soportar esfuerzos sin fracturarse (11).
- Orientación de discontinuidades: ajusta el riesgo de inestabilidad debido a la orientación de las discontinuidades en relación con el plano de excavación. Dependiendo de la inclinación de las discontinuidades, el riesgo de deslizamientos o fallas puede aumentar (11).
- Caídas por gravedad y lajamiento: este factor tiene en cuenta el comportamiento de la roca frente a la caída de material debido a la gravedad o al lajamiento (desprendimiento de capas de roca) (11).
- Número de estabilidad N' : es un parámetro que combina todos los factores anteriores para indicar la estabilidad general de la excavación. Un valor más alto de N' indica una mayor estabilidad (11).
- Radio hidráulico S : es una medida de la cantidad de agua presente en el macizo rocoso y su efecto en la estabilidad de la excavación. Un mayor volumen de agua puede afectar la estabilidad de las paredes de la excavación (11).
- Abertura máxima (A_{max}): define el límite superior de las dimensiones de la excavación. Exceder este límite puede comprometer la estabilidad de las paredes del tajeo.
- Tensión admisible de sostenimiento (TAS): es el esfuerzo máximo que un sistema de sostenimiento puede soportar sin comprometer la estabilidad de la excavación. Este parámetro se utiliza para determinar el diseño de los sistemas de soporte en la excavación (11).

- Sistema RMR (Rock mass rating): un sistema utilizado para clasificar el macizo rocoso en función de su calidad geomecánica, basado en factores como la resistencia de la roca, las discontinuidades y las condiciones de agua (10).
- Q-System: otro sistema de clasificación de macizos rocosos que también tiene en cuenta factores como la resistencia a la compresión, las discontinuidades y la presencia de agua (11).

CAPÍTULO III

MÉTODOLOGÍA

3.1 Método y alcances de la investigación

3.1.1. Métodos de la investigación

a) Método general

El método científico, ya que se va a observar, identificar, analizar y explicar fenómenos de manera sistemática y objetiva. En este caso, el método científico se usa para investigar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso en el contexto del dimensionamiento del tajeo 75, de la Unidad Minera San Cristóbal.

b) Método específico

El método experimental deductivo, se utilizará para observar cómo las condiciones geomecánicas afectan las dimensiones del Tajeo 75, usando análisis directos y pruebas experimentales para validar las hipótesis formuladas.

3.2 Alcances de la investigación

a) Tipo de investigación

Es aplicativa, ya que la investigación tiene un enfoque práctico, ya que busca aplicar los resultados para mejorar el dimensionamiento geomecánico del tajeo 75. El objetivo es solucionar problemas concretos en el diseño de las excavaciones y asegurar la estabilidad de la mina.

b) Nivel de investigación

Es descriptivo ya que la investigación se centra en describir detalladamente las características geomecánicas del macizo rocoso y cómo estas influyen en el diseño y dimensionamiento del tajeo, sin alterar las condiciones naturales del sitio, simplemente observando y describiendo la situación actual.

3.3 Diseño de la investigación

Es experimental, porque implica la manipulación y observación de variables bajo condiciones controladas. Se experimentará con diferentes configuraciones del tajeo para estudiar cómo los cambios en las variables geomecánicas afectan la estabilidad de las excavaciones y los pilares de seguridad.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

Todos tajeos de explotación de la Unidad Minera San Cristóbal.

3.4.2 Muestra

El tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, de la Unidad Minera San Cristóbal.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1 Técnicas utilizadas en la recolección de datos

Observación: esta técnica se utilizará para identificar y analizar las características geomecánicas del macizo rocoso en el Tajeo 75. Se llevará a cabo una observación directa en el campo, registrando las condiciones geológicas, las propiedades del macizo rocoso y los posibles signos de inestabilidad, como fisuras o fracturas, que puedan influir en el diseño del tajeo.

Recopilación: la información relevante sobre las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, como la resistencia, las tensiones in situ, la presencia de agua subterránea, y otros parámetros que serán utilizados para el dimensionamiento del tajeo. Estos datos pueden obtenerse mediante ensayos de campo, como el muestreo de roca, y el uso de modelos numéricos basados en simulaciones geomecánicas, utilizando programas y hacer uso de tesis, libros y laptop para el procesamiento de los datos.

3.5.2 Instrumentos utilizados en la recolección de datos

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

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propuesta de evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

La presente propuesta tiene como objetivo realizar una evaluación geomecánica detallada del tajeo 75, ubicado en el nivel 1220, de la veta 722, de la Unidad Minera San Cristóbal. La aplicación del sistema de clasificación rock mass rating (RMR) permitirá determinar la calidad del macizo rocoso y proponer estrategias de sostenimiento adecuadas para mejorar la estabilidad de la excavación.

El estudio incluirá la recolección y análisis de parámetros geomecánicos clave, tales como la resistencia a la compresión simple de la roca, el índice de calidad de la roca (RQD), el espaciamiento y condiciones de las discontinuidades, así como la influencia del agua en el macizo. Con base en estos datos, se definirán recomendaciones técnicas para mejorar el diseño del tajeo y garantizar su sostenibilidad estructural.

Los resultados de esta evaluación permitirán optimizar el dimensionamiento del tajeo 75, asegurando la continuidad de las operaciones mineras bajo condiciones seguras y eficientes. Además, se establecerá un esquema de sostenimiento adecuado, contribuyendo a la reducción de costos asociados a intervenciones correctivas y mejorando la productividad en la Unidad Minera San Cristóbal.

4.2 Caracterización geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

4.2.1 Zonificación del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

La zonificación de la Unidad Minera San Cristóbal, clasifica el macizo rocoso en distintas áreas según sus características geomecánicas clave, tales como la caracterización del RMR. A partir de la caracterización de los parámetros, esta zonificación permite realizar un diseño de explotación adecuada, optimizando la estabilidad del tajeo y reduciendo los riesgos operativos asociados. De este modo, el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722 se beneficia de una estrategia de sostenimiento adaptada a las condiciones geomecánicas de cada zona, asegurando una operación minera más eficiente y segura.

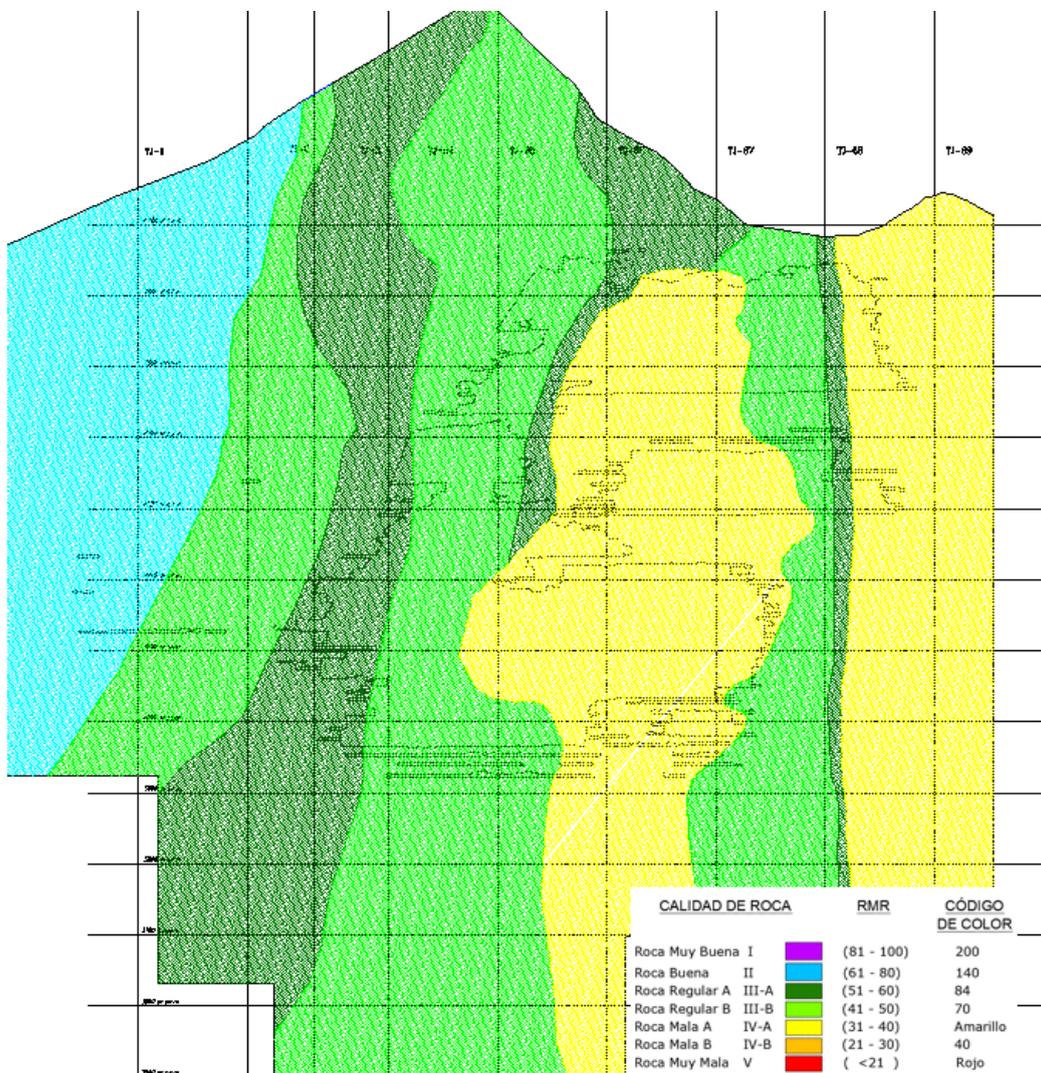


Figura 10. Zonificación del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

A continuación, se presenta la caracterización geomecánica con los valores exactos y la interpretación de los resultados para el tajeo 75.

Tabla 4. Parámetros geomecánicos evaluados del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722

Parámetro	Rango considerado	Puntuación asignada
Resistencia a la compresión simple (MPa)	100 - 250 MPa	12
RQD (%)	50 - 75 %	13
Espaciamiento de discontinuidades de las juntas (mm)	200 – 600 mm	10
Condiciones de las discontinuidades	Superficie lisa o rugosa (1 – 5 mm)	10
Condiciones de agua en el macizo	Mojado - Húmedo	4
TOTAL RMR	Suma de valores	49

Tabla 5. Interpretación de los resultados del RMR (tajeo 75, nivel 1220, veta 722)

Rango de RMR	Clasificación del macizo	Condiciones del macizo rocoso
81 - 100	Muy bueno	Excavaciones estables sin soporte
61 - 80	Bueno	Poco soporte requerido
41 - 60	Regular	Requiere soporte moderado
21 - 40	Malo	Requiere fuerte sostenimiento
< 20	Muy malo	Excavaciones inestables

Interpretación:

El macizo rocoso del tajeo 75, con un RMR de 49, se clasifica dentro de la categoría regular según el sistema RMR es de tipo de roca regular IIIB. Esto sugiere que el macizo tiene una calidad moderada y presenta condiciones en las que pueden ocurrir desprendimientos o inestabilidad si no se implementan las medidas de sostenimiento adecuadas.

Dado el RMR de 49, se deben implementar medidas de sostenimiento moderado para garantizar la estabilidad de la excavación y la seguridad de los trabajadores.

El uso de cable bolting en el tajeo 75, nivel 1220, veta 722, con un RMR de 49 es esencial para mejorar la estabilidad y seguridad de la excavación, especialmente en zonas con condiciones geomecánicas moderadas. Este método refuerza áreas con discontinuidades o fallas, mejora la cohesión de la roca, y controla los esfuerzos tectónicos, lo que previene deslizamientos y colapsos. Además, optimiza el diseño de sostenimiento, reduciendo la necesidad de sistemas costosos como el shotcrete, y se aplica eficientemente en zonas de baja

estabilidad, como las clasificadas como Zona III. Así, el cable bolting incrementa la seguridad, distribuye las tensiones de manera más equilibrada, y garantiza un soporte duradero y económico, adaptándose a las condiciones específicas del macizo rocoso y minimizando riesgos operativos.

4.2.2 Estudio situacional del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

La estabilidad del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722 es un aspecto clave para garantizar la seguridad operativa y la eficiencia en la explotación minera de la Unidad Minera San Cristóbal. Los análisis geomecánicos han identificado varios problemas, como el factor de seguridad insuficiente, lo que aumenta el riesgo de desprendimientos y colapsos en las paredes del tajeo, comprometiendo tanto la seguridad del personal como la infraestructura minera. Además, el pilar de 5 metros de longitud de altura no amortigua adecuadamente las deformaciones causadas por los esfuerzos en las caras libres de los tajos, lo que exige un rediseño del sistema de sostenimiento.

El flujo de agua subterránea en la zona afecta la cohesión del macizo rocoso, lo que incrementa el riesgo de deslizamientos. La presencia de agua y las discontinuidades en la roca comprometen la estabilidad global del tajeo, lo que refuerza la necesidad de medidas adicionales de refuerzo, como el uso de cable bolting. Este tipo de intervención es fundamental para mejorar la cohesión de la roca, controlar los esfuerzos tectónicos y garantizar la estabilidad a largo plazo de la excavación.

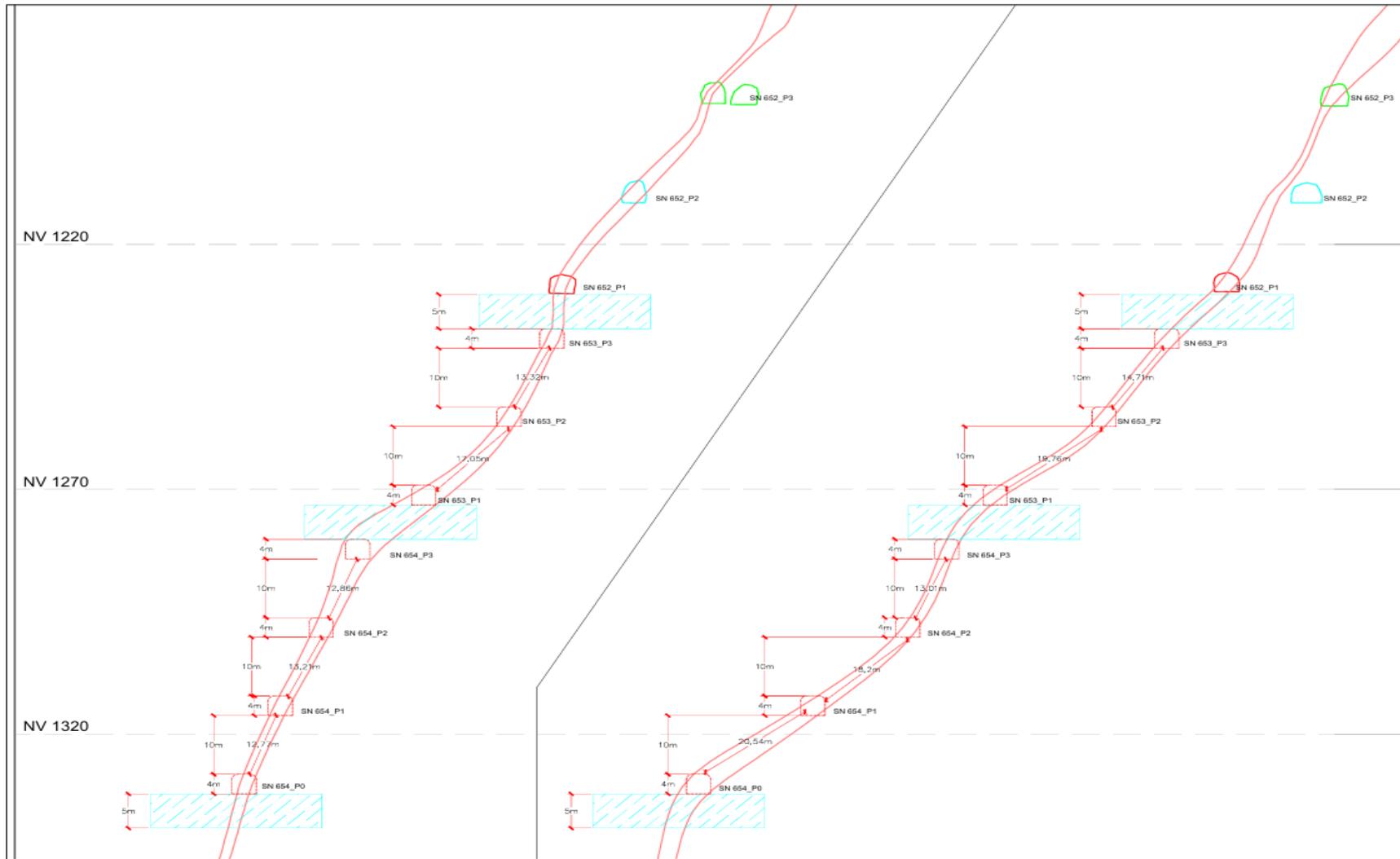
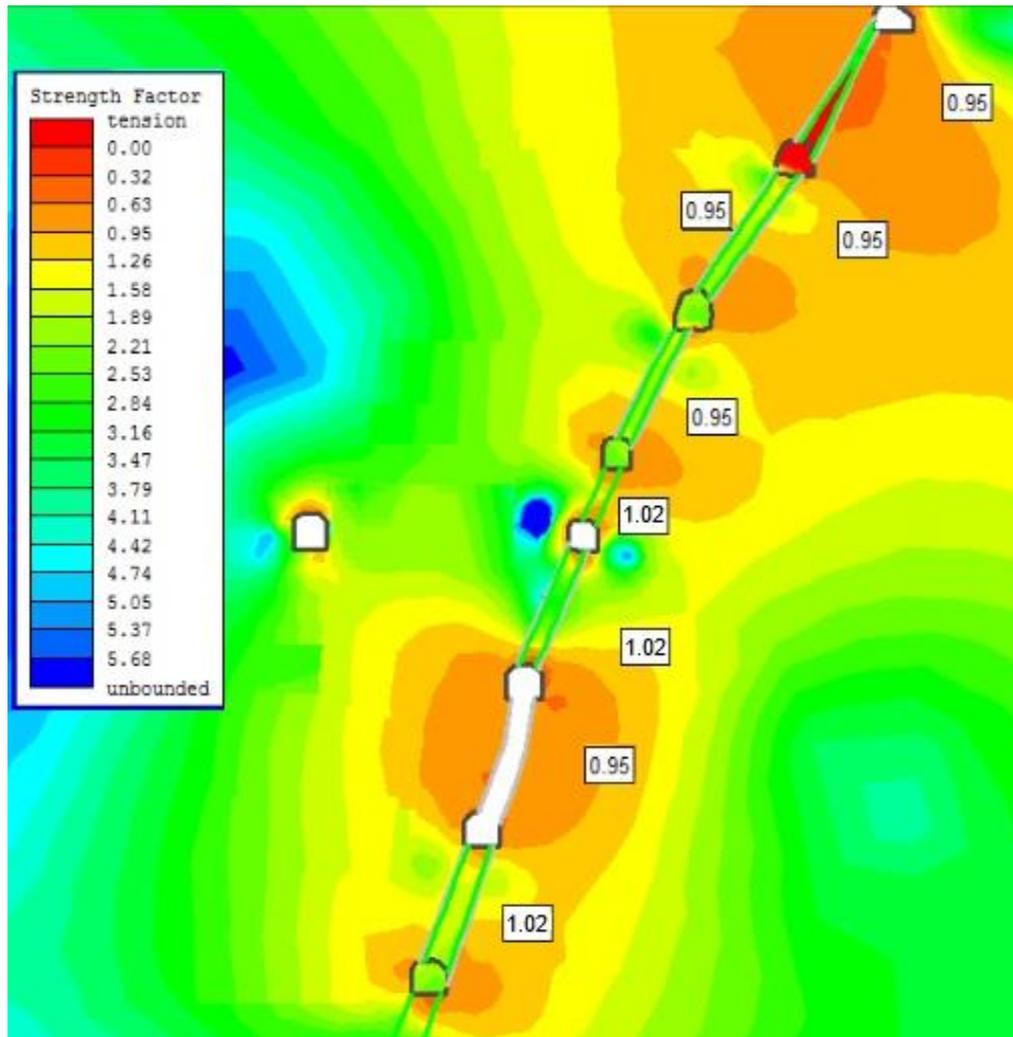


Figura 11. Estudio situacional - Diseño del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal. Tomada del Departamento de Geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (13)

a) Estudio situacional - Análisis situacional del factor de seguridad

La figura muestra los factores de resistencia del terreno con bancos de 10 metros de altura. El valor de 0.95 en las aberturas disparadas indica una estabilidad moderada del tajeo, lo que implica un riesgo de desprendimientos leves. Las tensiones generadas por la excavación no están completamente controladas, lo que podría causar inestabilidad, especialmente en áreas con discontinuidades o baja resistencia de la roca. Se requieren medidas adicionales de sostenimiento para garantizar la seguridad y evitar incidentes.

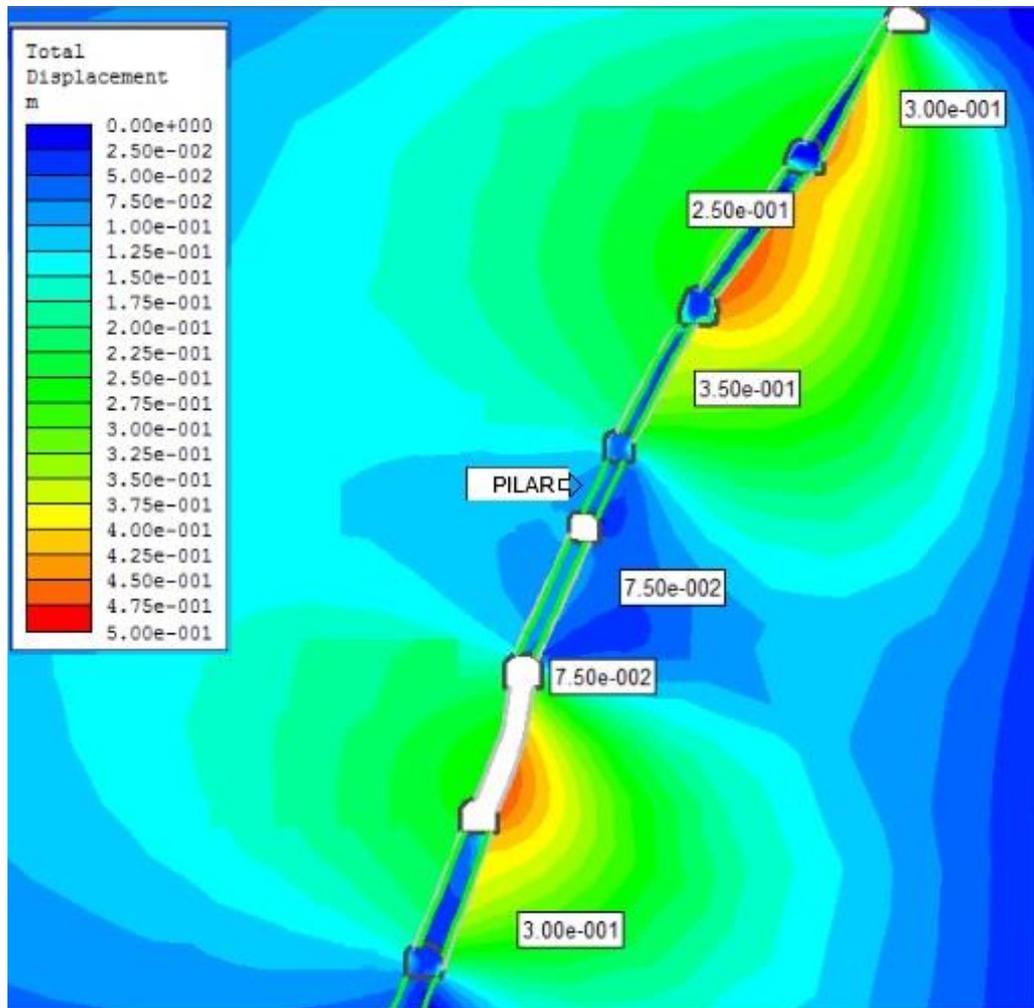


*Figura 12. Estudio situacional - Análisis situacional del factor de seguridad
Tomada del Departamento de Geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (13)*

b) Estudio situacional - Deformación que experimentará el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

En la figura mostrada, se presentan las deformaciones que el terreno experimentará durante las fases finales de la explotación minera del tajeo 75, nivel 1220, veta 722. Este análisis es crucial para comprender cómo la roca responderá a los esfuerzos generados por la excavación a medida que se avance hacia las etapas más profundas de la explotación. Se destaca que la

mayor deformación, de 7.5 cm, ocurrirá en la penúltima fase de la explotación, lo que indica un aumento significativo en la tensión del macizo rocoso a medida que se acerca al final de la actividad minera.



*Figura 13. Estudio situacional - Deformación que experimentará el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.
Tomada del Departamento de Geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (13)*

Interpretación

En la explotación del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal, la altura de bancos es de 10 metros, en el que se ha determinado un factor de seguridad de 0.95, esto indica que durante las operaciones de minería se están presentando eventos de desprendimiento. Este factor de seguridad bajo sugiere que las tensiones en las paredes del tajeo no están siendo completamente controladas, lo que compromete la estabilidad de la excavación.

Además, se observa que el pilar de 5 metros de longitud de altura no está siendo efectivo en amortiguar las deformaciones generadas por los esfuerzos presentes en las caras libres del tajeo. Esta insuficiencia en el diseño del pilar refuerza la necesidad de reconsiderar su longitud y

estructura para asegurar un mejor control de las deformaciones y evitar riesgos adicionales en la excavación.

Por otro lado, la zona presenta un radio hidráulico (S) de 5.7, lo que indica un flujo moderado de agua que podría afectar la cohesión de la roca, aumentando el riesgo de inestabilidad. La presencia de agua, al infiltrarse a través de las discontinuidades, puede reducir la resistencia de la roca y facilitar el deslizamiento. Asimismo, el número de estabilidad (N) de 0.89 señala que la estabilidad del Tajeo 75 está comprometida, sugiriendo que se deben implementar refuerzos adicionales, como el uso de cable bolting, para mejorar la cohesión del macizo rocoso y minimizar los riesgos de colapsos.

Dado que el tiempo de autoporte para el tajeo es de 36 horas, es fundamental realizar el relleno detrítico antes de que se cumpla este plazo. Esto ayudará a reducir las tensiones acumuladas y garantizar la estabilidad de las paredes del tajeo, evitando posibles problemas operativos y asegurando la seguridad durante la explotación.

4.3. Evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

4.3.1 Propuesta de mejora del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

La optimización del dimensionamiento del tajeo 75, ubicado en el nivel 1220, de la veta 722, de la Unidad Minera San Cristóbal, es crucial para garantizar la seguridad operativa y maximizar la eficiencia de la extracción minera. El análisis previo de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, junto con la evaluación de los parámetros de estabilidad, ha revelado que el tajeo presenta zonas con características que requieren un diseño de sostenimiento más robusto y adaptado a las condiciones geológicas específicas.

La propuesta de mejora del dimensionamiento tiene como objetivo ajustar el diseño y las prácticas de sostenimiento a las condiciones actuales del macizo rocoso, minimizando los riesgos de inestabilidad y optimizando el uso de recursos en la operación. Este enfoque integral considera tanto el refuerzo de las estructuras existentes como la implementación de nuevas tecnologías y técnicas para mejorar la estabilidad del tajeo.

El proceso de mejora abarcará diversos aspectos como la adecuación del sistema de sostenimiento (utilización de cable bolting, pernos de anclaje, entre otros), la implementación

de medidas para el control de agua subterránea, así como la redefinición de los parámetros de voladura y diseño de la excavación. Además, se propone un monitoreo continuo para ajustar los métodos utilizados conforme avanzan las labores y cambian las condiciones geomecánicas.

Esta propuesta busca asegurar la continuidad de las operaciones mineras con un enfoque en la seguridad y la sostenibilidad, promoviendo una minería eficiente que reduzca los riesgos para los trabajadores y la infraestructura, mientras optimiza los costos operativos.

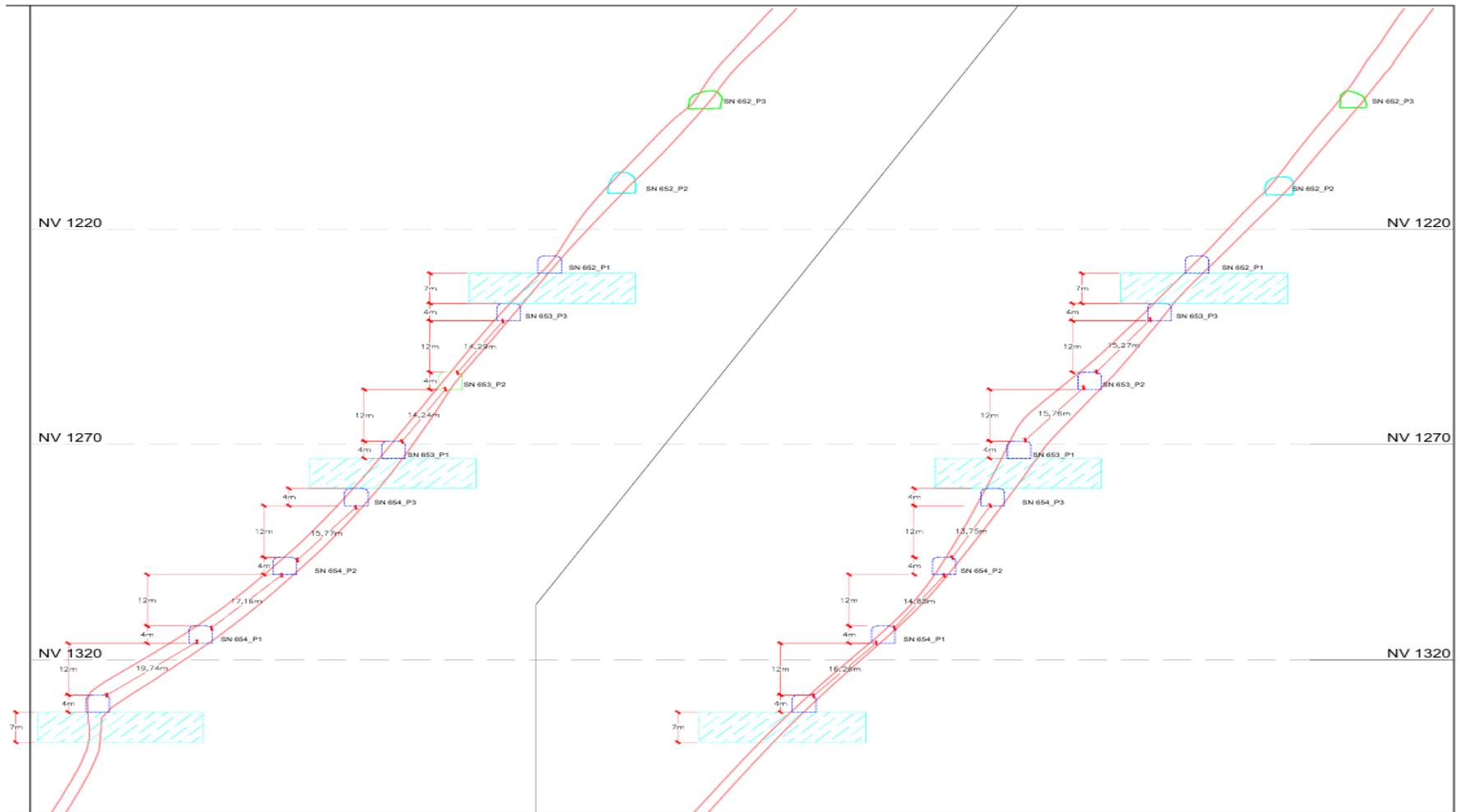
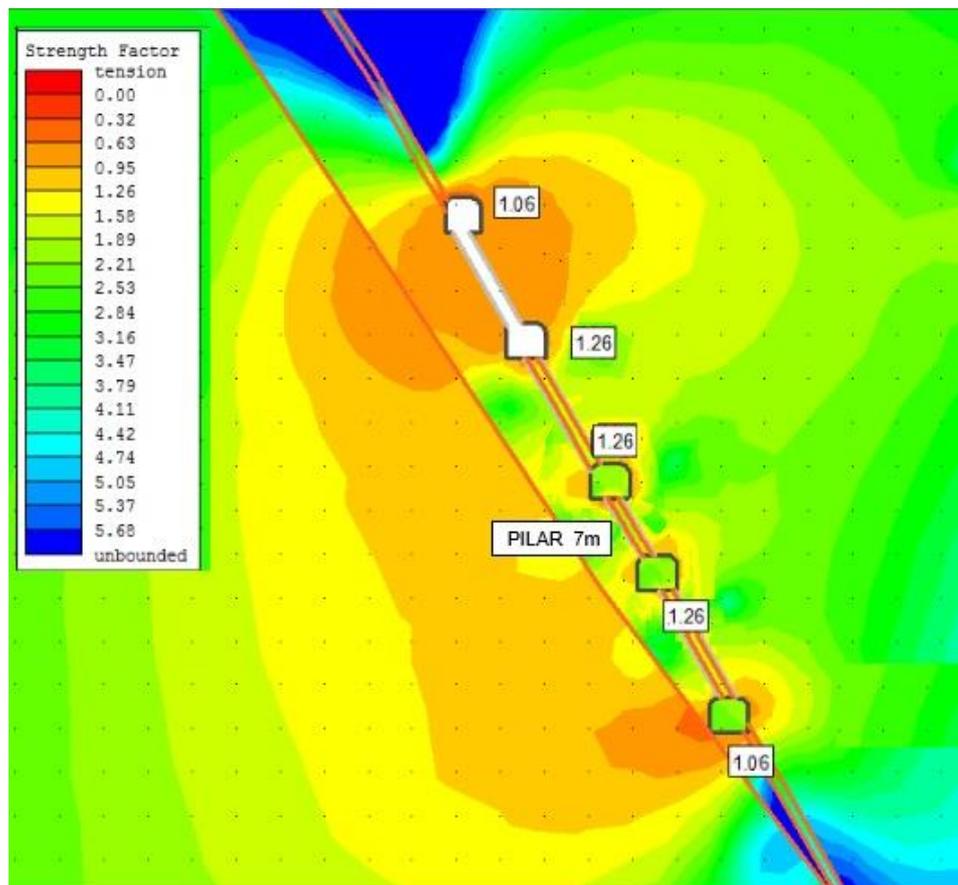


Figura 14. Propuesta de mejora del diseño del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

a) Propuesta de mejora - Análisis situacional del factor de seguridad

En la figura siguiente, se muestran el factor de seguridad de la excavación durante la última fase de explotación, con bancos de 12 metros de altura. Se evidencia que el valor obtenido es 1.06 en las aberturas disparadas y 1.26 en las aberturas con relleno. Estos valores reflejan que la estabilidad de la excavación es adecuada, ya que superan el límite de seguridad establecido. La diferencia entre ambos valores resalta el papel del relleno en el fortalecimiento del macizo rocoso, disminuyendo la probabilidad de desprendimientos o colapsos en el tajeo.



*Figura 15. Propuesta de mejora del factor de seguridad del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal
Tomada del Departamento de Geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (13)*

b) Propuesta de mejora - Deformación que experimentará el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

La figura muestra una deformación máxima de 4.8 cm en la zona intermedia de un tramo vertical de 60 metros, lo que refleja una concentración de esfuerzos que podría afectar la estabilidad del terreno. Se recomienda aplicar refuerzos en esa área para evitar desplazamientos o fallas estructurales.

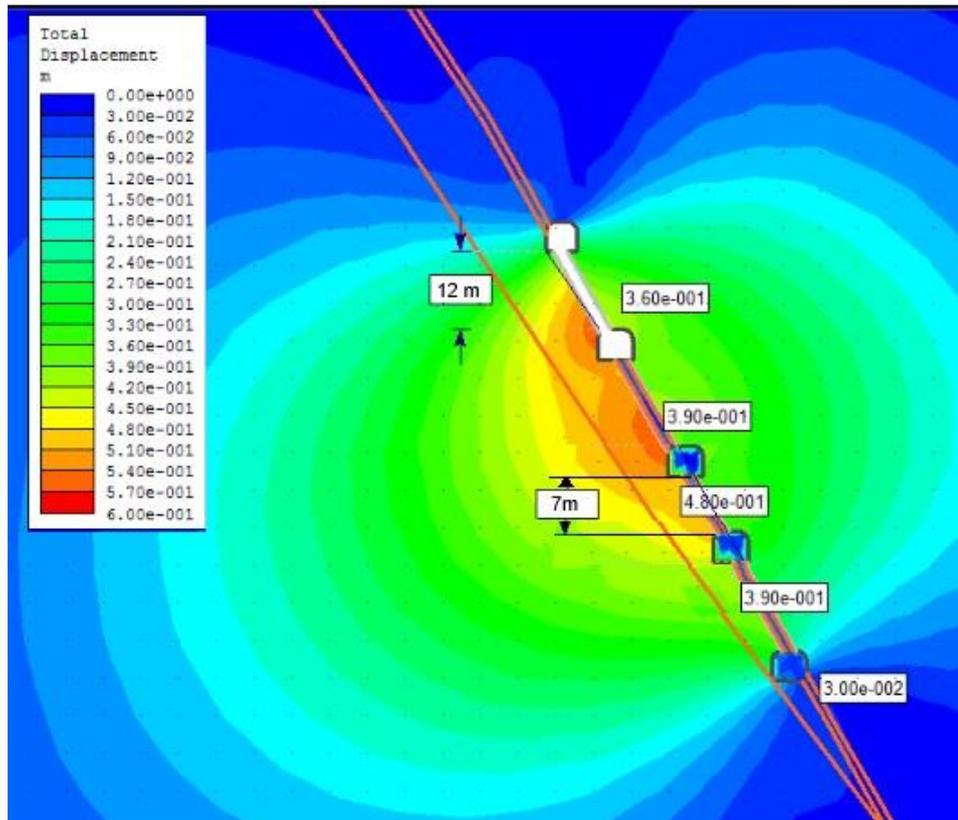


Figura 16. Propuesta de mejora - Deformación que experimentará el tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal
Tomada del Departamento de Geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (13)

Interpretación:

El análisis de los factores de resistencia del terreno, con valores entre 1.06 y 1.26 para bancos de 12 metros, es crucial para evaluar la estabilidad y capacidad de carga de la roca durante la explotación minera. Estos valores reflejan las propiedades mecánicas del terreno y su interacción con la geometría de la excavación, lo que es esencial para prever su comportamiento. Aunque la resistencia del terreno es adecuada, se requiere vigilancia constante, especialmente en áreas críticas propensas a deslizamientos.

El análisis tenso deformacional indica que las mayores deformaciones alcanzarán 4.8 cm durante la explotación, lo que refleja los movimientos internos del terreno y los esfuerzos de la excavación. Para mitigar estos riesgos, es necesario rellenar las cavidades dentro de 72 horas para evitar la descompresión progresiva del terreno y preservar la estabilidad de los niveles superiores.

Además, se destaca la importancia de proteger las encajonantes de roca filita, recomendando perforar los taladros largos a una distancia mínima de 20 cm de la caja techo

para reducir impactos. También es esencial controlar el suministro de explosivos para evitar fracturas o tensiones adicionales en la roca.

c) Índice de calidad "Q" modificado

Se obtuvo el valor a partir de los parámetros del RMR, con estos datos se calculó el valor del índice de calidad "Q" modificado del macizo rocoso, se determinó mediante el mapeo geomecánico en la etapa de preparación del tajeo, se utilizó una ecuación específica a continuación para el cálculo.

Tabla 6. Parámetros geomecánicos para el cálculo del índice de calidad "q" modificado del tajeo 75, nivel 1220, veta 722

Tipo roca:	Conglomerado	
RQD:	70	%
Jn:	0.4	m
Jr:	0.004	m
Ja:	0.4	mojado - húmedo
Q':	1.84	

Reemplazando valores en la ecuación:

$$Q = \frac{70 \times 0.4}{0.004 \times 0.4}$$

Q = 1.84, para un valor promedio de RMR: 49

d) Cálculo del factor de ajuste "A" de esfuerzo en la roca

El factor de esfuerzo "A" se calculó a partir de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca y el esfuerzo máximo inducido en el macizo rocoso, según lo detallado a continuación.

Tabla 7. Parámetros geomecánicos para el cálculo del factor de ajuste "A" de esfuerzo en la roca del tajeo 75, nivel 1220, veta 722

Profundidad o encampane	980.00	m
Peso Específico	28	KN/m ³
Esfuerzo. Vertical (σ_v)	27.4	Mpa
K: parámetro de rigidez.	1.114	
σ_{eff} : Esfuerzo efectivo (resistencia de la roca a la fractura).	31	Mpa
σ_{max} : Esfuerzo máximo generado por la excavación (UCS)	180	Mpa

En el anexo 2 se muestra el cálculo del parámetro de rigidez
 En el anexo 3 se muestra y el cálculo del esfuerzo efectivo (resistencia de la roca a la fractura)

Ecuación para el cálculo del factor de ajuste "A" de esfuerzo en la roca

$$A = 0.1125 * \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{eff}} - 0.125$$

Reemplazando en la ecuación

$$A = 0.1125 * \frac{180}{32} - 0.125$$

$$A = 0.54$$



*Figura 17. Factor de esfuerzo en la roca, A
 Tomada de la Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas, Osinergmin (8)*

Interpretación

El valor del factor de ajuste de 0.51 indica una concentración de esfuerzos moderada en la roca, lo cual sugiere que el macizo rocoso ya no se comporta de forma puramente elástica. Aunque este valor no representa una condición crítica de inestabilidad, sí revela que existen

tensiones no uniformes que podrían generar deformaciones localizadas o zonas de debilidad, especialmente si no se considera un diseño adecuado de sostenimiento o refuerzo.

e) Cálculo del factor de ajuste "B" por orientación de discontinuidades

Las discontinuidades en la roca como fallas o fracturas afectan la estabilidad según su orientación. El factor "B" ajusta el riesgo de inestabilidad considerando cómo se alinean estas discontinuidades con el plano de excavación.

Fórmula de B:

$$B = \cos(\theta)$$

Donde:

θ : Ángulo de inclinación del tajeo es de 70°

θ_B : Buzamiento entre juntas fallas es de 60°

Reemplazando en la ecuación

$$B = \cos(60)$$

$$B = 0.50$$

Interpretación:

El valor calculado del factor de ajuste "B" es de 0.57 indica una orientación intermedia de las discontinuidades respecto al plano de excavación. Esto significa que existe una moderada posibilidad de inestabilidad estructural, ya que las fracturas o fallas no están completamente alineadas con el tajeo, pero tampoco son totalmente favorables. En términos prácticos, este valor sugiere que puede haber cierto riesgo de deslizamientos o separaciones a lo largo de las discontinuidades, especialmente si se combinan con otros factores desfavorables como presión de agua, vibraciones o poca cohesión del macizo rocoso.

f) Cálculo del factor de ajuste "C" para caídas por gravedad

El factor "C" evalúa el comportamiento de la roca frente a caídas de material debidas a la gravedad o el lajamiento. Este ajuste es necesario cuando las excavaciones tienen paredes altas o la roca es inestable (7).

Fórmula de C:

$$C = 8 - 6 \times \cos(\theta)$$

Donde:

θ : Ángulo de inclinación del tajeo es de 60°

Reemplazando en la ecuación

$$C = 8 - 6 \times \cos (60)$$

$$C = 5$$

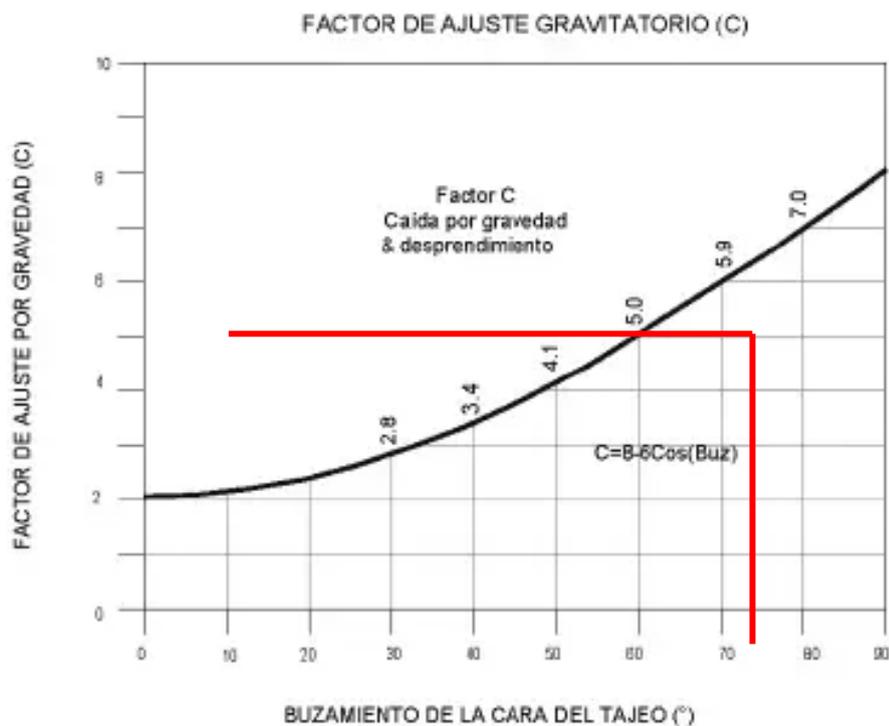


Figura 18. Factor de ajuste gravitatorio C
Tomada de la Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas, Osinergmin (8)

Interpretación:

El factor de ajuste "C" es de 5, para un tajeo de 60° de buzamiento, esto indica un riesgo moderado-alto de caída de rocas debido a la influencia de la gravedad, ya que, a mayor inclinación, aumenta la probabilidad de deslizamiento o desprendimiento de bloques. Esto implica la necesidad de realizar una evaluación exhaustiva de la estabilidad de la excavación, implementar medidas de sostenimiento con cable bolting y un diseño adecuado de escalonamiento, así como monitorear continuamente la zona para detectar zonas de inestabilidad.

g) Cálculo del número de estabilidad N'

El número de estabilidad N' , es un parámetro que combina todos los factores anteriores para indicar la estabilidad general de la excavación. Un valor mayor de N' , sugiere una mayor estabilidad (7)..

Fórmula de N' :

$$N' = Q \cdot A \cdot B \cdot C$$

Donde:

- Q : Índice de calidad de la roca es de 1.84
- A : Factor de ajuste por esfuerzo es de 0.54
- B : Factor de ajuste por discontinuidades es de 0.50
- C : Factor de ajuste por caídas es de 5

Reemplazando en la ecuación

$$N' = 1.84 \times 0.54 \times 0.5 \times 5$$

$$N' = 2.5$$

Interpretación:

El cálculo del número de estabilidad N' , en este caso da un valor de 2.5, sugiere una estabilidad moderada de la excavación. Este valor se obtiene al combinar el índice de calidad de la roca (Q), los factores de ajuste por esfuerzo (A), discontinuidades (B) y caídas (C). Un valor de N' , mayor a 2.5 generalmente indica una mayor estabilidad, mientras que valores inferiores pueden señalar que se requieren medidas adicionales de soporte geomecánico, para mejorar la seguridad y evitar posibles fallas en la excavación.

h) Cálculo del radio hidráulico S

El radio hidráulico (S) es una relación geométrica utilizada para evaluar la estabilidad de una excavación. Se calcula como el cociente entre el área expuesta de la excavación (A) y su perímetro expuesto (P). Este valor, junto con el número de estabilidad (N), forma parte del Método de Mathews, utilizado en geomecánica para analizar el riesgo de deslizamientos o colapsos en las excavaciones. Un S alto indica una forma más estable hidráulicamente, mientras que un S bajo puede indicar mayor vulnerabilidad (7).

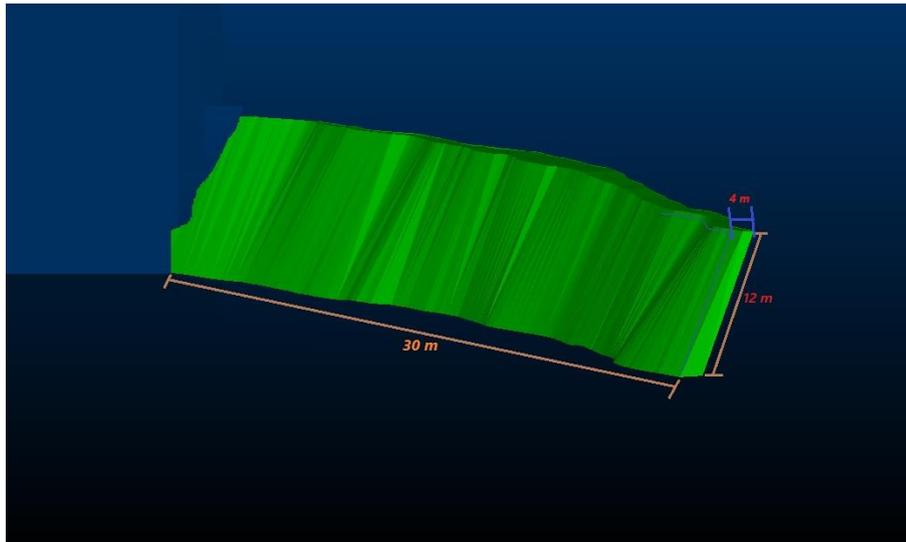


Figura 19. Cuerpo mineralizado del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

De la figura se tiene los siguientes datos:

- a: Ancho de sección de 4 metros
- h: Altura de la sección es de 12 metros
- w: Longitud de la sección es de 30 metros

- **Cálculo del radio hidráulico (caja techo), se expresa de la siguiente ecuación:**

$$HR \text{ caja techo} = \frac{w \times h}{2 \times w + 2 \times h}$$

Reemplazando en la ecuación

$$HR \text{ caja techo} = \frac{30 \times 12}{2 \times 30 + 2 \times 12}$$

$$HR \text{ caja techo} = 4.29 \text{ m}$$

Interpretación:

El cálculo del radio hidráulico (caja techo) es de 4.29 m, lo que significa que el radio hidráulico para la caja techo es relativamente alto. Esto indica que la forma de la excavación, específicamente en el área del techo, tiene un buen equilibrio entre el área expuesta y el perímetro, lo que sugiere una mayor estabilidad hidráulica. Es decir, esta zona tiene una forma que ayuda a distribuir las presiones hidráulicas (por ejemplo, el agua) de manera más eficiente, lo que mejora la estabilidad estructural de la excavación.

- Cálculo del radio hidráulico (techo), se expresa de la siguiente ecuación:

$$HR \text{ caja techo} = \frac{a \times w}{2 \times a + 2 \times w}$$

Reemplazando en la ecuación

$$HR \text{ caja techo} = \frac{4 \times 30}{2 \times 4 + 2 \times 30}$$

$$HR \text{ caja techo} = 1.76 \text{ m}$$

Interpretación:

El cálculo del radio hidráulico (caja techo) es de 1.76 m, que es más bajo en comparación con el de la caja techo. Este valor indica que el techo tiene una forma más delgada en relación con su área expuesta y perímetro, lo que podría hacerla más susceptible a las fuerzas hidráulicas. La excavación en esta zona puede tener una mayor vulnerabilidad ante la presión del agua o la erosión, lo que podría influir negativamente en la estabilidad de la excavación si no se toman medidas preventivas adecuadas.

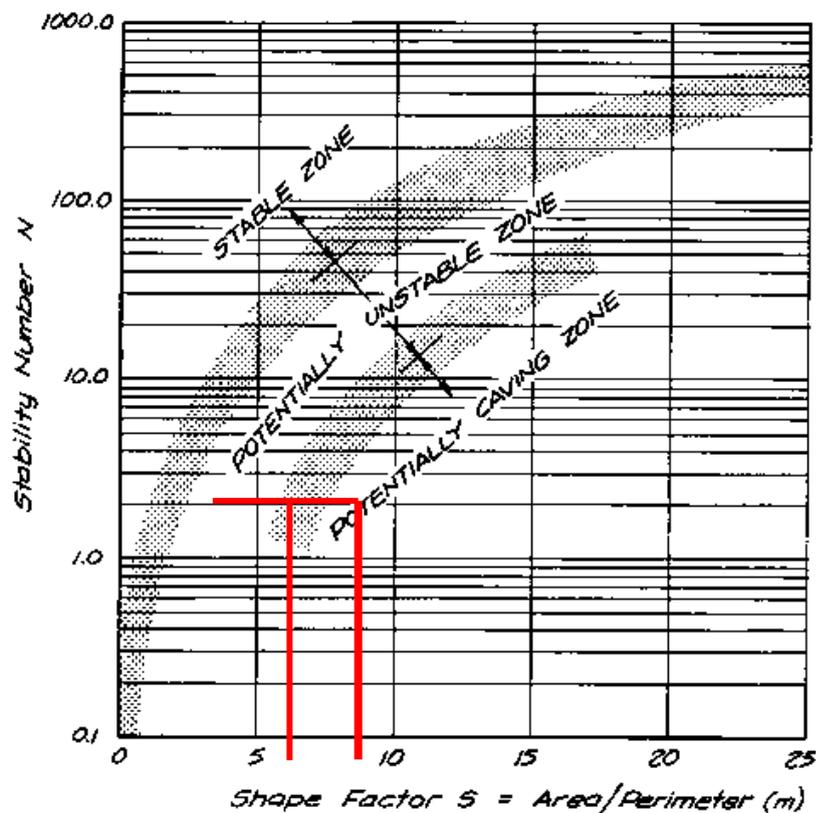


Figura 20. Número de estabilidad (N) vs radio hidráulico (caja techo)
Tomada de Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 m in hard rock (9)

Interpretación:

El valor más alto de HR en la caja techo sugiere una forma más estable y eficiente para resistir los efectos hidráulicos.

El valor más bajo de HR en el techo indica una forma menos eficiente en términos hidráulicos, lo que podría requerir una mayor atención en cuanto a sostenimiento y diseño estructural para evitar desestabilizaciones.

En resumen, las excavaciones con un HR más bajo en áreas como el techo pueden necesitar medidas adicionales de control, como sistemas de drenaje o refuerzos estructurales, para garantizar su estabilidad a largo plazo.

i) Cálculo de la abertura máxima

El cálculo de la abertura máxima determina el ancho máximo (w) que puede tener un tajo subterráneo para asegurar su estabilidad geotécnica, en función de la altura (H) y el radio hidráulico crítico (S). Este valor es clave en el diseño minero subterráneo, ya que establece el límite seguro de excavación sin comprometer la integridad de las paredes ni provocar colapsos (7).

Fórmula de abertura máxima es la siguiente:

$$W = \frac{2 * H * S}{(H - 2 * S)}$$

Donde:

- H: Altura del tajeo es de 12 m
- S: Radio hidráulico (caja techo) es de 4.29 m

Reemplazando la fórmula de abertura máxima:

$$W = \frac{2 * 12 * 4.29}{(12 - 2 * 4.29)}$$

$$W = 30 \text{ m}$$

Interpretación:

El cálculo de la abertura máxima (W) permite determinar el ancho máximo que puede tener un tajo subterráneo sin comprometer su estabilidad, considerando la altura del tajeo (H) y el

radio hidráulico (S). En este caso, con una altura de 12 m y un radio hidráulico de 4.29 m, se obtiene una abertura máxima de 30 m. Este valor indica que la excavación podría mantenerse estable sin sostenimiento adicional, siempre que la calidad del macizo rocoso sea adecuada y se mantengan las condiciones geomecánicas estimadas. Un diseño de estas características permite optimizar la operación minera al reducir costos por sostenimiento y mejorar la eficiencia en la extracción.

j) Cálculo de TAS (tensión admisible de sostenimiento)

El tiempo de autosoporte (TAS) es el período en que una excavación subterránea puede mantenerse estable sin soporte geomecánico. Se calcula utilizando el Abaco de Bieniawski, que relaciona la calidad del macizo rocoso (RMR) que en el tajeo se tiene un RMR de 49 y la abertura máxima (SPAN) que según los cálculos desarrollados se obtuvo 30 metros de excavación. Al consultar el Gráfico de TAS, siguiente.

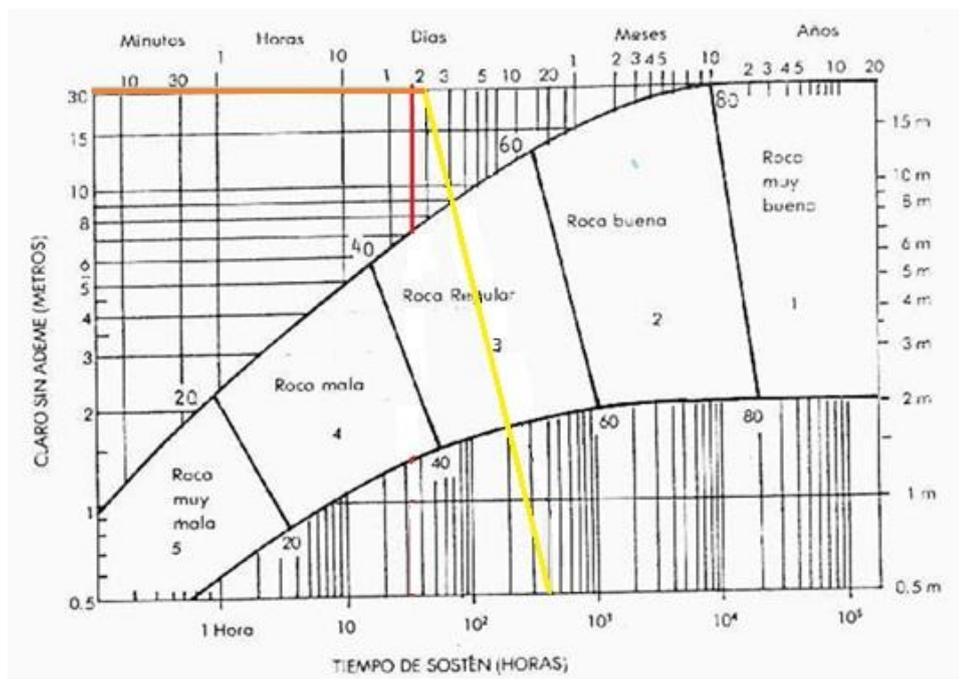


Figura 21. TAS (tensión admisible de sostenimiento), Abaco de Bieniawski Tomada de Engineering Rock Mass Classifications (10)

Interpretación:

Con un RMR de 49, el ábaco de Bieniawski indica un tiempo de autosoporte (TAS) de aproximadamente 1 a 2 días, lo que significa que la excavación subterránea podrá mantenerse estable sin sostenimiento solo durante ese breve periodo. Esta condición refleja una calidad media del macizo rocoso, que si bien no es extremadamente débil, tampoco es lo suficientemente competente como para prescindir del soporte por mucho tiempo.

En términos prácticos, esto obliga a que el sostenimiento geomecánico (como pernos, mallas metálicas o shotcrete) se instale de forma temprana e inmediata luego de la excavación, para evitar desprendimientos de roca o colapsos que comprometan la seguridad. Además, se deben aplicar protocolos de monitoreo y revisión continua del comportamiento del terreno durante este corto lapso de autosoporte.

4.4 Prueba de hipótesis

4.4.1. Prueba de hipótesis general

En este estudio, se formularon dos hipótesis principales: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa, las cuales se describen de la siguiente manera:

a) Hipótesis nula

- H_0 : La propuesta de la evaluación geomecánica no será factible y viable para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

b) Hipótesis alternativa

- H_a : La propuesta de la evaluación geomecánica será factible y viable para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

4.4.2. Análisis de datos

La hipótesis de esta investigación sugiere que la propuesta de la evaluación geomecánica contribuirá a optimizar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal. Para verificar su validez, se realizaron análisis y comparaciones de los 8 resultados de la evaluación de los factores de seguridad del estudio situacional en relación a la situación de mejora.

• Criterios de decisión:

- Si $P \geq 0.05$, se acepta la hipótesis alternativa (H_a) y se rechaza la hipótesis nula (H_0).
- Si $P < 0.05$, se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_a).

A continuación, la tabla presenta una comparación entre los 8 resultados obtenidos de la evaluación de los factores de seguridad, los cuales se basan en un análisis situacional previo y posterior a la implementación de las mejoras. Esta comparación permite observar las diferencias en los valores obtenidos antes y después de la mejora en el dimensionamiento del tajeo, proporcionando una visión clara sobre el impacto de las modificaciones realizadas en los factores de seguridad del área estudiada.

Tabla 8. Comparación de los factores de seguridad del análisis situacional previo y posterior a las mejoras del dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

Numero de tajeo	Propuesta Situacional factor de seguridad	Estudio de mejora factor de seguridad
1	0.950	1.060
2	0.952	1.260
3	0.954	1.263
4	0.960	1.261
5	1.020	1.263
6	1.022	1.258
7	0.953	1.255
8	1.024	1.063

a) Prueba de t para muestras relacionada

Tabla 9. Estadísticas de muestras relacionadas

Estadísticos de muestras relacionadas

		Media	N	Desviación típ.	Error típ. de la media
Par 1	E.SITUACIONAL	,9794	8	,03546	,01254
	P.MEJORA	1,2104	8	,09193	,03250

Correlaciones de muestras relacionadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	E.SITUACIONAL y P. MEJORA	8	-,124	,770

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	E.SITUACIONAL - P. MEJORA	-,23098	,10256	,03626	-,31672	-,14523	-6,370	7	,000

Tomada de IBM SPSS Statistics for Windows, versión 25.0 (14)

Interpretación:

El análisis indicó un valor de P de 0.000, menor a 0.05, validando la hipótesis alternativa (Ha) y rechazando la nula (Ho). Esto confirma que la propuesta de la evaluación geomecánica será factible y viable para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75 del nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

CONCLUSIONES

- 1 El macizo rocoso del tajeo 75, con un RMR de 49, se clasifica como de calidad moderada (categoría IIIB) según el sistema RMR, lo que implica que puede presentar inestabilidad si no se implementan medidas adecuadas de sostenimiento. Para garantizar la seguridad, es crucial utilizar cable bolting, que refuerza zonas con discontinuidades y mejora la cohesión de la roca.
- 2 Este método optimiza la estabilidad de la excavación, controla los esfuerzos tectónicos y reduce la necesidad de sistemas costosos como el shotcrete. El cable bolting es una solución efectiva y económica en áreas con condiciones geomecánicas moderadas, aumentando la seguridad y distribuyendo las tensiones de manera equilibrada.
- 3 El análisis situacional del tajeo 75, nivel 1220, veta 722 evidencia un factor de seguridad de 0.95, lo que indica un riesgo considerable de inestabilidad por el insuficiente control de tensiones en las paredes. El pilar de 5 metros no cumple con la función de amortiguamiento requerida, lo que resalta la necesidad de rediseñarlo.
- 4 Asimismo, el flujo moderado de agua con un radio hidráulico de 5.7 compromete la resistencia del macizo rocoso, elevando la probabilidad de fallas. El bajo número de estabilidad con un N igual 0.89 y el limitado tiempo de autosoporte 36 horas reafirman la urgencia de implementar refuerzos como el cable bolting y ejecutar oportunamente el relleno detrítico para asegurar la estabilidad estructural del tajeo.
- 5 En la propuesta de mejora, el análisis de los factores de resistencia del terreno del tajeo 75, nivel 1220, veta 722, muestra valores adecuados entre 1.06 y 1.26 para bancos de 12 metros, pero requiere monitoreo constante, especialmente en áreas críticas. Las deformaciones máximas de 4.8 cm durante la explotación indican esfuerzos internos del terreno, por lo que es crucial rellenar las cavidades en un plazo de 48 horas para mantener la estabilidad.
- 6 El pilar de 7 metros ayudará a amortiguar las deformaciones, lo que subraya la necesidad de mejorar en el diseño. También se recomienda perforar los taladros a 20 cm de la caja techo para proteger las encajonantes de roca filita y controlar el suministro de explosivos para evitar fracturas y tensiones adicionales.
- 7 En la propuesta de mejora, el análisis geomecánico del tajeo 75 muestra un índice de calidad de la roca (Q) de 1.84, con un valor de RMR de 49, lo que indica una estabilidad moderada.

Los factores de ajuste, incluyendo esfuerzo en la roca de 0.51, orientación de discontinuidades del 0.57, y caídas por gravedad de 5, sugieren riesgos moderados de inestabilidad y caída de rocas. El número de estabilidad N' es de 2.5 refleja una excavación con estabilidad moderada, mientras que el radio hidráulico de la caja techo es de 4.29 m y la abertura máxima de 30 m, lo cual indica una excavación relativamente estable. Sin embargo, el tiempo de autoporte da como resultado de 2 días, lo que indica que la excavación requiere soportes geomecánicos tempranos para evitar posibles fallas periodo por el cual debe ser rellenado el tajeo una vez realizado la voladura.

- 8 El análisis con un valor de P de 0.000 validó la hipótesis alternativa (H_a) y rechazó la hipótesis nula (H_0), aseverando que la propuesta de evaluación geomecánica es viable y factible para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, nivel 1220, veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda implementar de manera urgente cable bolting en las zonas más críticas del tajeo 75 para mejorar la estabilidad de la excavación. Es crucial que el cable bolting se utilice como medida principal de sostenimiento para distribuir de manera más equilibrada las tensiones, prevenir desprendimientos y reducir costos en otros métodos de refuerzo más costosos.
2. Se recomienda mejorar el diseño del pilar de 5 metros, incrementándolo el tamaño de altura a 7 o 7.5 metros para que pueda amortiguar adecuadamente las deformaciones. Además, se debe aplicar cable bolting de manera estratégica y realizar el relleno detrítico en el plazo de 48 horas para reducir tensiones acumuladas y garantizar la estabilidad de la excavación a largo plazo.
3. Se recomienda realizar un monitoreo constante de las condiciones geomecánicas del tajeo 75, especialmente en áreas críticas. Es necesario rellenar las cavidades dentro de las 48 horas y considerar un diseño mejorado para los pilares, aumentando su altura o robustez. Además, se debe cuidar la perforación de los taladros y controlar la cantidad de explosivos usados para evitar tensiones adicionales.
4. Se recomienda mejorar la estabilidad de la excavación por medio de la aplicación de un sostenimiento geomecánico temprano debido al bajo tiempo de autoporte de la excavación. Además, se debe implementar monitoreo constante de las condiciones geomecánicas, especialmente en zonas de riesgo de caídas y deslizamientos, y asegurarse de que las aberturas sean correctamente dimensionadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVARADO, Fabiola. Modelamiento geostadístico de la clasificación Geomecánica de Bieniawski (RMR). Tesis (Título de Magister en Minería). Santiago : Universidad de Chile, 2020.
2. TORRES, Elmer. Evaluación geomecánica para determinar las dimensiones del tajeo 7013 nivel 4300 cuerpo M y pilar de seguridad aplicado a la explotación por subniveles en la empresa minera Los Quenuales S.A. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cerro de Pasco : Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2024.
3. CONDORI, Alexis. Dimensionamiento GEOMECÁNICO EN VETAS ANGOSTAS DEL Tajo Piloto en la Unidad Minera Antapite. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Puno : Universidad Nacional del Altiplano, 2021.
4. MEJIA, Diego. Evaluación del macizo rocoso aplicando el método gráfico de estabilidad para el dimensionamiento geomecánico de tajeos. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo : Universidad Continental, 2021.
5. GUTIERREZ, Diana. Influencia del estudio Geomecánico de la Veta Ramal Techo Zona Este en la Optimización del Método de Minado, U.E.A. Ticlio. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2024.
6. AREA DE GEOLOGÍA. *Informe de geologico de las reservas y recursos minerales*. Yauli : Unidad Minera San Cristóbal, 2020.
7. BARTON, Niels, LIEN, Robert y LUNDE, Johan. *The Rock Mechanics Handbook: For Underground Excavations*. Rotterdam, Países Bajos : A.A. Balkema, 2002.
8. OSINERGMIN. *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Lima : INVERSIONES IAKOB S.A.C, 2017.
9. MATHEWS, Kenneth E, y otros. *Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 m in hard rock*. Canadá : CANMET (Canadian Centre for Minerals and Energy Technology), 1981.

10. BIENIAWSKI, Zbigniew Tadeusz. *Engineering Rock Mass Classifications*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1989.
11. BARTON, Nicholas, LIEN, Robert y LUNDE, John. *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. s.l. : Rock Mechanics (Publicada por Springer), 1974.
12. BARBOSA, Gabriela. *Handbook de geomecánica para la pequeña minería y la minería artesanal de Chile. V Tesis (Título de Ingeniero Civil)*. Valparaíso : Universidad Tecnica Federico Santa Maria, 2021.
13. VOLCAN COMPAÑÍA MINERA S.A.A. . *Departamento de Geomecanica*. Yauli : Unidad Minera San Cristóbal, 2023.
14. IBM CORP. *IBM SPSS Statistics for Windows, versión 25.0*. Armonk, NY : IBM Corp., 2017.
15. AREA DE GEOMECÁNICA. *Informe de zonificación Geomecanica*. Yauli : Unidad Minera San Cristóbal, 2024.
16. AREA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA. *Informe de perforación y voladura de la Tajeo 75 del nivel 1220 de la Veta 722*. Yauli : Unidad Minera San Cristóbal, 2024.

ANEXOS

Anexo 1
Matriz de consistencia

Propuesta de evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general
¿Cómo influye la propuesta de evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal?	Desarrollar la propuesta de evaluación geomecánica para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.	La propuesta de evaluación geomecánica será factible y viable para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas
¿Cómo influye la caracterización geomecánica para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal?	Realizar la caracterización geomecánica para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 122,0 de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.	La caracterización geomecánica será factible para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.
¿Cómo influye la evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal?	Realizar la evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.	La evaluación de los parámetros del Ábaco de Barton será factible para mejorar el dimensionamiento del Tajeo 75, del Nivel 1220, de la Veta 722, Unidad Minera San Cristóbal.

Anexo 2
Cálculo del parámetro de rigidez

<i>INGRESO DE DATOS</i>	
GSI: Índice de estabilidad geológica	44
D: Ángulo de fricción interna	0.42
P (KN/M3): Densidad del material del talud	28
H (mt): Altura del talud	109

$$E_{rm} (MPa) = 100000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75 + 25D - GSI)/11)}} \right)$$

$$\frac{E_{rm}}{E_i} = \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60 + 15D - GSI)/11)}} \right)$$

Eh

(Mpa) = Erm / Ei:

<i>SALIDA DE DATOS</i>	
Erm (Mpa): Módulo de elasticidad medio	0.652
Erm/Ei: _Relación entre el módulo de elasticidad medio y el módulo inicial de elasticidad	0.054
Eh (Mpa)	12.13

Fórmula para el cálculo del parámetro de rigidez:

$$K = 0.25 + 7 Eh (0.001 + 1/z) \quad \text{Eq. 1}$$

DONDE:

Z: Altura o profundidad del tajeo, es igual 109 metros

Remplazando fórmula:

$$K = 0.25 + 7 \times 12.13 (0.001 + 1/109) \quad \text{Eq. 1}$$

$$K = 1.114$$

Anexo 3

Cálculo del esfuerzo efectivo (resistencia de la roca a la fractura)

INGRESO DE DATOS		
Esfuerzo. Vertical (σv)	27.4	Mpa
K: Parámetro de rigidez	1.114	

Fórmula para el cálculo del esfuerzo efectivo (resistencia de la roca a la fractura)

$$\sigma \text{ eff} = \text{Esfuerzo. Vertical } (\sigma v) / \text{K: parámetro de rigidez}$$

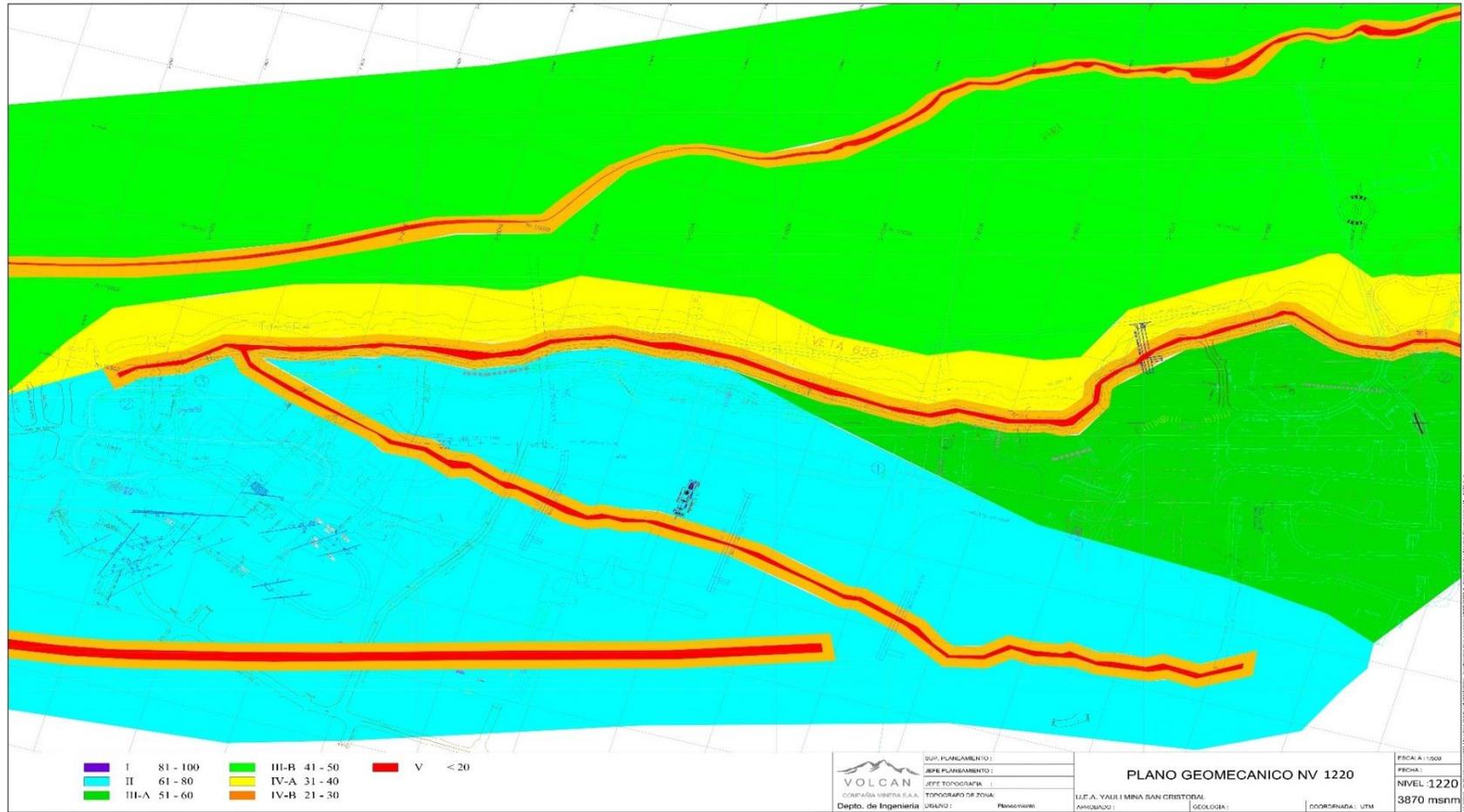
Reemplazando fórmula:

$$\sigma \text{ eff} = 27.4 / 1.114$$

$$\sigma \text{ eff} = 31$$

Anexo 4

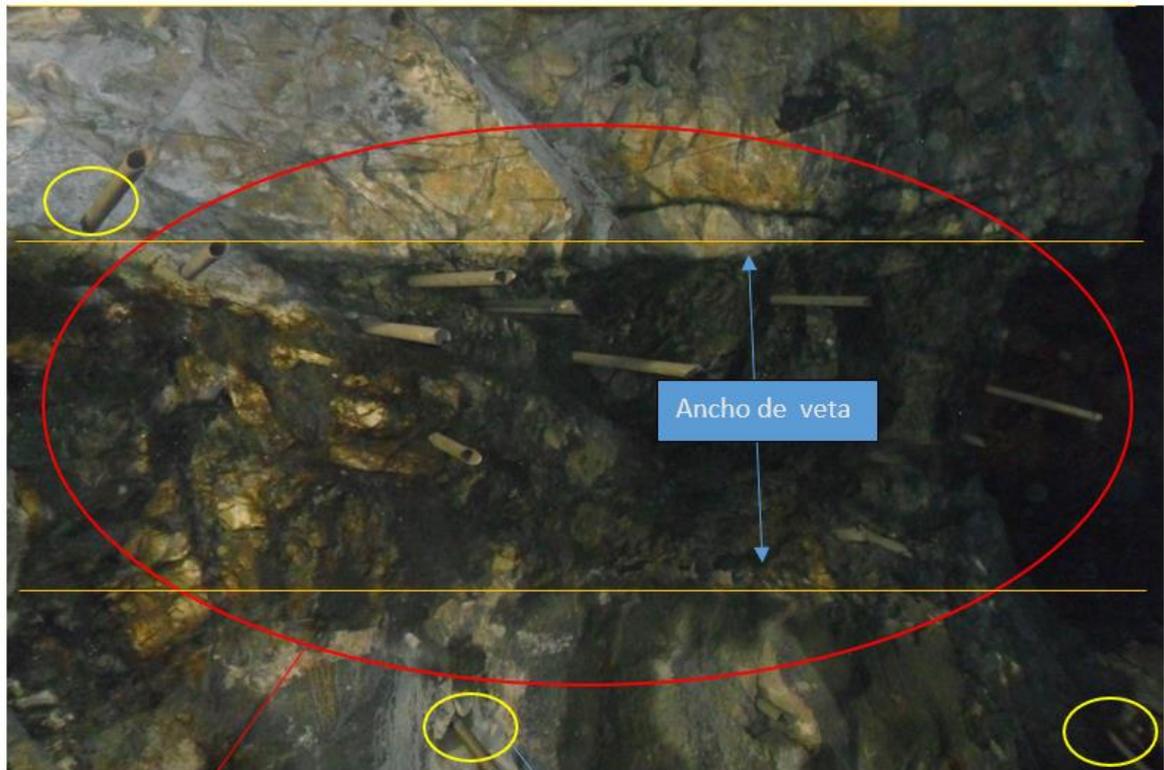
Zonificación geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal



Tomada del Informe de zonificación geomecánica de la Unidad Minera San Cristóbal (15)

Anexo 5

Análisis situacional operacional del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal



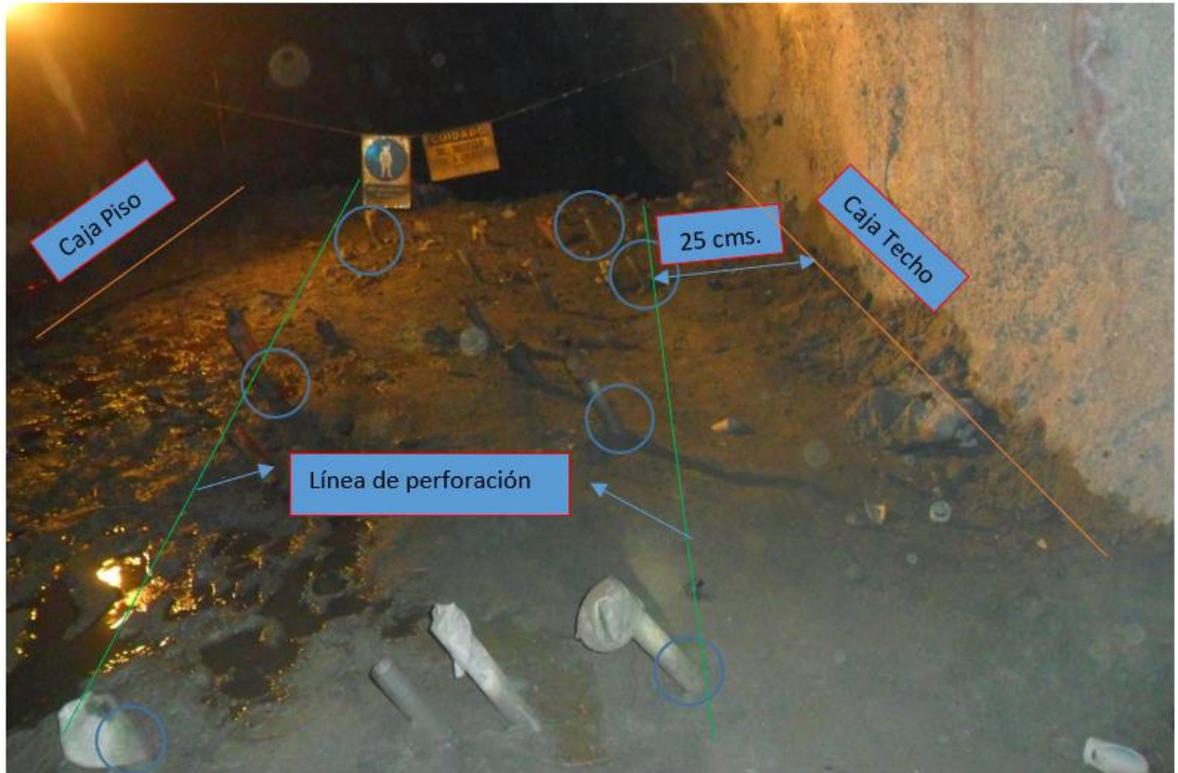
Tajeo 75 del nivel 1220 por el piso inferior no se tiene marcado el contorneo de veta para tener un mejor control como se puede apreciar en la foto. Además la altura de banco es 10 mts.

Taladro fuera de estructura no se carga (taladro anulado).

Tomada del Informe de perforación y voladura de la tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, de la Unidad Minera San Cristóbal (16)

Anexo 6

Análisis situacional de las deficiencias operacionales del tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, Unidad Minera San Cristóbal



Tomada del Informe de perforación y voladura de la tajeo 75, del nivel 1220, de la veta 722, de la Unidad Minera San Cristóbal (16)