



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Optimización del sostenimiento geomecánico en minas subterráneas con
macizo rocoso RMR 40 para garantizar el avance operativo continuo, Pasco
2026**

Tesis presentada por:

Charca Huaricallo, Fabrizzio Martin

ORCID: 0009-0001-4310-5625

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Dr. Ticona Corrales, Sergio

ORCID: 0000-0002-7221-6172

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 25 de Agosto del 2026

Dictamen: 018268-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 018268, presentado por:

2018240931 - CHARCA HUARICALLO FABRIZIO MARTIN

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DEL SOSTENIMIENTO GEOMECÁNICO EN MINAS SUBTERRÁNEAS CON MACIZO
ROCOSO RMR 40 PARA GARANTIZAR EL AVANCE OPERATIVO CONTINUO, PASCO 2026**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

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



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



Optimización del sostenimiento geomecánico en minas subterráneas con macizo rocoso RMR 40 para garantizar el avance operativo continuo, Pasco 2026

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.continental.edu.pe	2%
	Fuente de Internet	
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
3	Submitted to Universidad Nacional de Moquegua	1%
	Trabajo del estudiante	
4	repositorio.unap.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC	<1%
	Trabajo del estudiante	
6	Submitted to Universidad Continental	<1%
	Trabajo del estudiante	
7	Submitted to Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	<1%
	Trabajo del estudiante	
8	repositorio.ucsm.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	revista.enap.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	hdl.handle.net	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.bausate.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	Submitted to Universidad Nacional de Ingeniería	<1%
	Trabajo del estudiante	
13	apirepositorio.unh.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
14	repositorio.ucp.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

repositorio.uncp.edu.pe

DEDICATORIA

Principalmente a Dios, por ser mi guía en cada paso, por darme la fortaleza en los momentos de debilidad y por iluminar mi camino para alcanzar este sueño que hoy se hace realidad.

A mis padres, Oscar y Judith, por su amor infinito, por cada sacrificio silencioso y por nunca dejar de creer en mí. Todo lo que soy y lo que estoy logrando es gracias a ustedes, que con su esfuerzo y ejemplo me enseñaron a luchar y a no rendirme.

A mis hermanos, Eduardo y Maura, por su cariño sincero y por confiar en mí incluso cuando yo dudaba. Su apoyo y sus palabras fueron un impulso constante para seguir adelante.

A mi primo, Gustavo, por su apoyo incondicional, por estar presente en los momentos importantes y por brindarme siempre ánimo para continuar.

A mi primo, Joaquín, quien, a pesar de ser el más pequeño, es una motivación para seguir adelante y por quien deseo dejar un buen ejemplo que pueda guiar sus pasos.

A mi abuela, Sara, y a mi segunda mamá, Yola, por su amor tan puro, sus cuidados y sus consejos que marcaron mi camino. Gracias por ser un refugio y una fuente de cariño inagotable.

A cada uno de ustedes, que han sido mi fuerza, mi motivación y mi razón para no rendirme, les dedico este logro con todo mi corazón, como una pequeña muestra de todo lo que significan en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, por ser mi guía en cada paso, por darme la fortaleza en los momentos difíciles y la sabiduría necesaria para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, por su apoyo constante, por cada sacrificio silencioso y por nunca dejar de creer en mí. Gracias por sostenerme incluso en los momentos de duda y por ser el pilar fundamental que me permitió llegar hasta aquí.

A mis hermanos y primos, quienes han estado presentes a lo largo de este proceso de titulación, brindándome compañía, ánimo y fuerzas para seguir adelante.

Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a Grecia Mescua y Jorge Silva, por su paciencia y orientación, por guiar mis pasos y sembrar en mí enseñanzas que fortalecieron no solo mi formación profesional, sino también mi confianza para seguir creciendo.

A todos aquellos que, de alguna forma, dejaron una huella en este proceso, gracias por ser parte de este logro que hoy se convierte en realidad.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar en qué medida la optimización del sostenimiento geomecánico, mediante la comparación entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6, contribuye a mejorar la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y el avance operativo continuo en labores subterráneas de una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026. El estudio parte del problema operativo generado por la aplicación estandarizada de la malla N.º 8 en labores expuestas a fracturamiento, discontinuidades, humedad y efectos posteriores a la voladura, condiciones que incrementan el riesgo de desplazamientos, desprendimientos y mantenimiento no programado.

La metodología fue aplicada, comparativa, longitudinal y de campo. Se analizaron registros geomecánicos, reportes de voladura, datos de sostenimiento, producción, costos, intervalos de cambio, tiempos de intervención y desplazamiento máximo. Los resultados evidencian que la malla N.º 6 incrementó la producción promedio de 11,134.13 TPD a 13,541.40 TPD, redujo el desplazamiento máximo de 10.00 mm a 5.00 mm y duplicó el intervalo de cambio de 1.50 a 3.00 años. Aunque su costo directo promedio fue mayor, el costo anualizado por reposición disminuyó de 8.57 a 5.29 USD/m²-año, lo que evidencia una mejora técnica y operativa al considerar la vida útil del sostenimiento.

Se concluye que la malla electrosoldada N.º 6 constituye una alternativa de optimización más adecuada para labores con macizo RMR 40, siempre que su implementación se acompañe de control geomecánico, adecuada instalación, seguimiento post-voladura y evaluación periódica de costos. El aporte del estudio consiste en establecer criterios técnicos para seleccionar la malla de sostenimiento en función del comportamiento real del macizo y de la continuidad del ciclo operativo.

Palabras clave: sostenimiento geomecánico, RMR 40, malla electrosoldada, desplazamiento del macizo rocoso, avance operativo continuo.

ABSTRACT

This research aimed to determine the extent to which optimizing geomechanical support, by comparing No. 8 welded wire mesh with No. 6 welded wire mesh, contributes to improving the stability of the RMR 40 rock mass and the continuous operational progress in underground workings of a mining unit in Pasco, with applications to the period 2026. The study stems from the operational problem generated by the standardized application of No. 8 mesh in workings exposed to fracturing, discontinuities, moisture, and post-blast effects—conditions that increase the risk of displacements, rockfalls, and unscheduled maintenance.

The methodology was applied, comparative, longitudinal, and field-based. Geomechanical records, blasting reports, support data, production, costs, change intervals, intervention times, and maximum displacement were analyzed. The results show that mesh size No. 6 increased average production from 11,134.13 TPD to 13,541.40 TPD, reduced the maximum displacement from 10.00 mm to 5.00 mm, and doubled the replacement interval from 1.50 to 3.00 years. Although its average direct cost was higher, the annualized replacement cost decreased from USD 8.57 to 5.29/m²-year, demonstrating a technical and operational improvement when considering the support's lifespan.

It is concluded that welded wire mesh size No. 6 is a more suitable optimization alternative for working with RMR 40 rock mass, provided its implementation is accompanied by geomechanical control, proper installation, post-blast monitoring, and periodic cost evaluation. The study's contribution lies in establishing technical criteria for selecting the support mesh based on the actual behavior of the rock mass and the continuity of the operational cycle.

Keywords: Geomechanical support, RMR 40, welded wire mesh, rock mass displacement, continuous operational advance.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

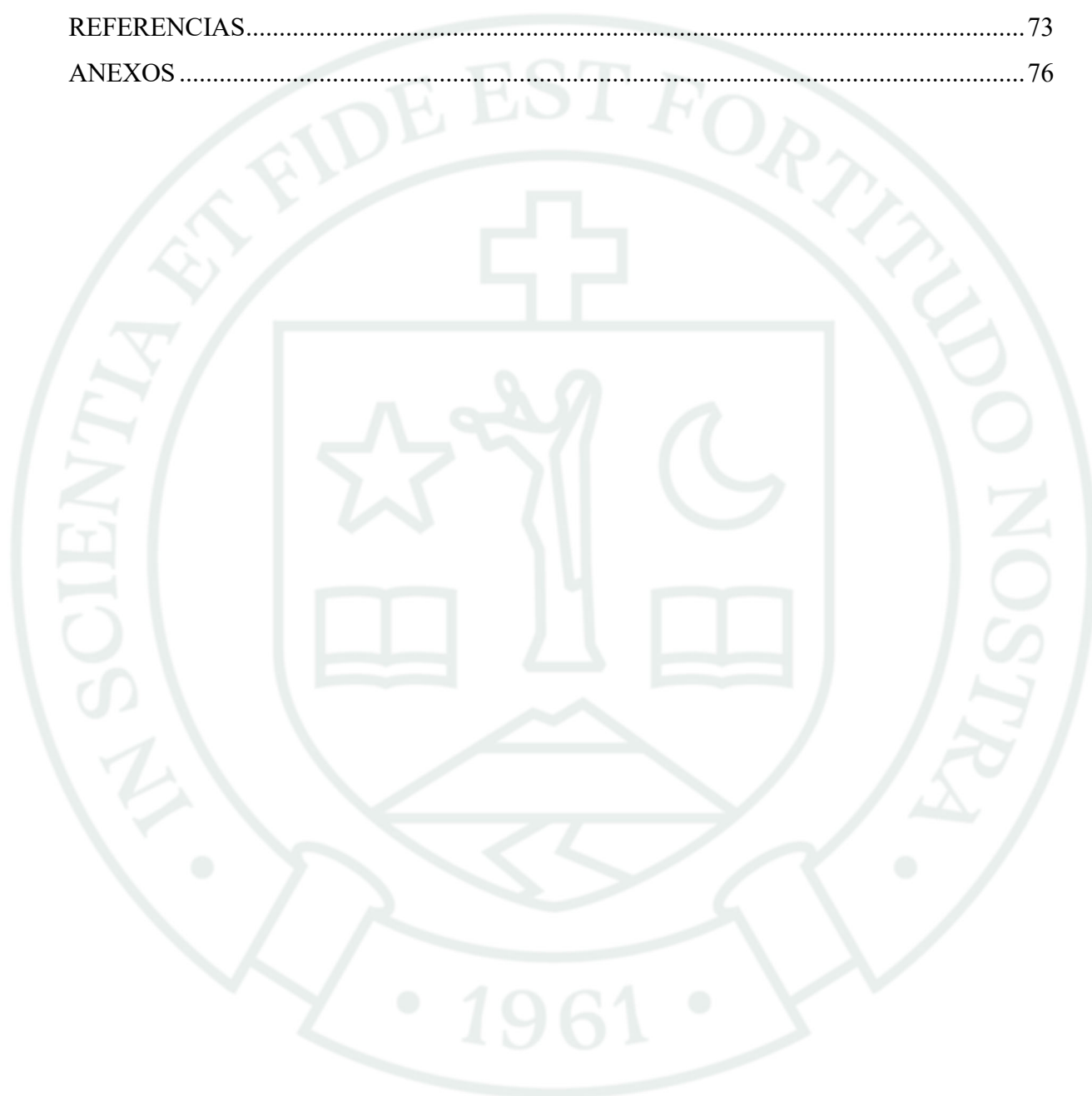
ÍNDICE DE FIGURAS

INDICE DE ANEXOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos de investigación	4
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.3. Preguntas de investigación.....	5
1.3.1. <i>Problema general</i>	5
1.3.2. <i>Problemas específicos</i>	5
1.4. Línea de investigación	5
1.5. Palabras clave	5
1.6. Solución propuesta.....	6
1.6.1. <i>Justificación e importancia</i>	6
CAPÍTULO II	8
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
2.1. Antecedentes	9
2.1.1. <i>Antecedentes internacionales</i>	9
2.1.2. <i>Antecedentes nacionales</i>	10
2.1.3. <i>Antecedentes locales</i>	12
2.2. Bases teóricas de la investigación.....	13
2.2.1. <i>Geomecánica aplicada a excavaciones subterráneas</i>	13
2.2.2. <i>Macizo rocoso y parámetros geomecánicos</i>	14
2.2.3. <i>Clasificación RMR (Rock Mass Rating)</i>	15
2.2.4. <i>Técnicas de Sosténimiento Geomecánico</i>	17

2.2.5.	<i>Efectos de la voladura sobre la estabilidad del macizo rocoso</i>	21
2.2.6.	<i>Sostenimiento geomecánico en minería subterránea</i>	22
2.2.7.	<i>Malla electrosoldada como elemento de sostenimiento superficial</i>	22
2.2.8.	<i>Criterios técnicos para la selección de malla de sostenimiento</i>	23
2.2.9.	<i>Desplazamiento del macizo rocoso y control de deformaciones</i>	23
2.2.10.	<i>Avance operativo continuo</i>	24
2.2.11.	<i>Optimización del sostenimiento geomecánico</i>	24
2.2.12.	<i>Definición de variables</i>	25
2.3.	<i>Hipótesis</i>	25
2.4.	<i>Variables</i>	26
CAPÍTULO III		27
3.	MARCO METODOLÓGICO	28
3.1.	Alcance y limitaciones	28
3.1.1.	<i>Alcance</i>	28
3.1.2.	<i>Limitaciones</i>	28
3.2.	Aporte	29
3.3.	Tipo y nivel de investigación	30
3.3.1.	<i>Tipo de investigación</i>	30
3.3.2.	<i>Nivel de investigación</i>	30
3.3.3.	<i>Diseño de investigación</i>	30
3.4.	Población y muestra	30
3.4.1.	<i>Población</i>	30
3.4.2.	<i>Muestra</i>	30
3.5.	Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos	31
3.6.	<i>Plan de desarrollo de la investigación</i>	31
CAPÍTULO IV		38
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	39
4.1.	Procedimiento de trabajo	39
4.1.1.	<i>Recopilación de datos</i>	39
4.1.2.	<i>Propuesta de optimización del sistema de sostenimiento</i>	41
4.1.3.	<i>Análisis visual comparativo antes y después de la propuesta de optimización</i>	51
4.2.	Estadística para demostración de optimización	59
4.2.1.	<i>Análisis inferencial</i>	59
4.2.2.	<i>Supuesto de continuidad</i>	59

4.2.3. <i>Supuesto de normalidad</i>	59
4.2.4. <i>Prueba de hipótesis</i>	61
4.3. <i>Discusión de resultados</i>	64
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS.....	73
ANEXOS	76



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Matriz de Operacionalización de variables	26
Tabla 2.	Parámetros y unidades	39
Tabla 3.	Tiempo de sostenimiento de malla N° 8.....	39
Tabla 4.	Desplazamiento de malla N° 8	40
Tabla 5.	Proyección de duración de malla N° 8	40
Tabla 6.	Resultados de parámetros de malla N°6.....	41
Tabla 7.	Resultados con malla N°8	42
Tabla 8.	Resultados con malla N°6	42
Tabla 9.	Resultados julio 2025 de malla N°8	42
Tabla 10.	<i>Resultados agosto 2025 de malla N°8.....</i>	<i>43</i>
Tabla 11.	<i>Resultados setiembre 2025 de malla N°8.....</i>	<i>44</i>
Tabla 12.	<i>Resultados julio 2025 de malla N°6</i>	<i>45</i>
Tabla 13.	<i>Resultados agosto 2025 de malla N°6.....</i>	<i>46</i>
Tabla 14.	<i>Resultados setiembre 2025 de malla N°6.....</i>	<i>47</i>
Tabla 15.	Matriz comparativa de indicadores técnicos y operativos.....	53
Tabla 16.	Base mensual de datos comparativos	54
Tabla 17.	Prueba de normalidad – Kolmogórov-Smirnov para la producción.....	60
Tabla 18.	Prueba de normalidad – Kolmogórov-Smirnov para el costo de sostenimiento.....	60
Tabla 19.	Prueba de normalidad – Kolmogórov-Smirnov para el desplazamiento.....	61
Tabla 20.	Comparación de parámetros entre malla N° 8 y malla N° 6	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Concepto de Geomecánica	14
Figura 2.	Clasificación RMR	15
Figura 3.	Shotcrete	18
Figura 4.	Pernos de roca.....	19
Figura 5.	Enmallado subterráneo	20
Figura 6.	Zonificación geomecánica transversal en las Zona SW y SE	32
Figura 7.	Zonificación geomecánica y calidades de masa rocosa.....	32
Figura 8.	<i>Instalación de malla electrosoldada N° 8</i>	33
Figura 9.	<i>Sostenimiento de malla N° 8</i>	34
Figura 10.	<i>Instalación de malla N° 6</i>	34
Figura 11.	<i>Sostenimiento de malla N° 6</i>	35
Figura 12.	Comparativa de producción antes y después.	48
Figura 13.	Comparativa de costo de sostenimiento antes y después.	49
Figura 14.	Comparativa de intervalo de cambio de malla antes y después.	49
Figura 15.	Comparativa de tiempo de intervención antes y después.	50
Figura 16.	Comparativa de desplazamiento antes y después.	50
Figura 17.	<i>Registro de producción</i>	51
Figura 18.	Costo de sostenimiento.....	51
Figura 19.	Producción mensual comparativa.....	55
Figura 20.	Costo directo y costo anualizado.....	55
Figura 21.	Desplazamiento e intervalo de cambio.....	56
Figura 22.	Balance porcentual de indicadores	56
Figura 23.	Indicadores normalizados	57
Figura 24.	Relación producción-desplazamiento.....	58
Figura 25.	Tiempo de intervención e intervalo de cambio	58

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.....	76
Anexo 2. Ficha Técnica de malla Electrosoldada N° 6 cocada 3"x3" y N° 8 4"x4"	78
Anexo 3: Panel fotográfico.....	81



INTRODUCCIÓN

La minería subterránea en la región de Pasco enfrenta desafíos geomecánicos significativos debido a las características del macizo rocoso clasificado como RMR 40, caracterizado por fracturas, discontinuidades y presencia de agua. Estas condiciones incrementan el riesgo de desprendimientos y deformaciones, especialmente tras los procesos de perforación y voladura, afectando directamente la estabilidad de las excavaciones, la seguridad del personal y la continuidad del avance operativo.

El objetivo principal de esta investigación es determinar en qué medida la optimización del sostenimiento geomecánico, mediante la comparación técnico-operativa entre la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6, mejora la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y contribuye al avance operativo continuo. Para ello, se analizaron registros operativos correspondientes al periodo julio-setiembre de 2025, considerando producción, costo directo, costo anualizado, intervalo de cambio, tiempo de intervención y desplazamiento máximo. La investigación se desarrolla en una unidad minera de Pasco y formula una propuesta de aplicación para el periodo 2026. A partir de los resultados obtenidos, se establecen criterios técnicos para una selección más objetiva de la malla de sostenimiento, evitando decisiones basadas únicamente en la estandarización o disponibilidad del material. El aporte de este estudio radica en proporcionar criterios técnicos y operativos para optimizar el sostenimiento en condiciones similares de macizo RMR 40, contribuyendo a mejorar la estabilidad de las excavaciones, reducir fallas asociadas al sostenimiento y favorecer un avance operativo más seguro y continuo. Además, los resultados podrán servir como referencia para otras operaciones subterráneas con condiciones geomecánicas semejantes en la región de Pasco, fortaleciendo la seguridad y eficiencia en la minería subterránea.



CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La minería subterránea desarrollada en labores con macizo rocoso RMR 40 presenta condiciones geomecánicas desfavorables para la estabilidad del contorno excavado. Este tipo de macizo se caracteriza por fracturamiento, presencia de discontinuidades, humedad y susceptibilidad a desplazamientos después de los procesos de perforación y voladura. En estas condiciones, el sostenimiento superficial no solo cumple una función de protección, sino que se convierte en un componente decisivo para mantener la seguridad, reducir desprendimientos y evitar interrupciones del ciclo de minado.

En la unidad minera objeto de estudio se ha utilizado de manera estandarizada la malla electrosoldada N.º 8 como parte del sistema de sostenimiento. Sin embargo, la selección de este elemento no siempre se sustenta en una evaluación comparativa frente a las condiciones reales del macizo RMR 40 ni frente a los efectos generados por las voladuras. Esta situación puede ocasionar que el sostenimiento instalado no responda adecuadamente a la deformación del contorno, a la caída de fragmentos rocosos y a la necesidad de mantener un avance operativo continuo.

El problema técnico se manifiesta en desplazamientos visibles del macizo, mayor frecuencia de mantenimiento, reposición de malla, incremento de tiempos improductivos y riesgo de paralizaciones no programadas. Estos efectos impactan directamente en la producción diaria, en la continuidad del ciclo perforación-voladura-limpieza-sostenimiento y en los costos de sostenimiento. Por ello, el análisis del sostenimiento no debe limitarse al costo directo por metro cuadrado, sino que debe incorporar la vida útil, la capacidad de retención, el desplazamiento máximo, los tiempos de intervención y el costo anualizado por reposición.

Frente a esta problemática, la malla electrosoldada N.º 6 se plantea como alternativa de optimización debido a su mayor calibre y menor abertura, características que podrían mejorar

la capacidad de control superficial del macizo. No obstante, su implementación requiere ser evaluada técnicamente mediante indicadores comparables con los obtenidos por la malla N.º 8, evitando decisiones basadas únicamente en la disponibilidad del material o en prácticas operativas tradicionales.

En consecuencia, el problema de investigación se centra en determinar si la optimización del sostenimiento geomecánico mediante la comparación y aplicación de criterios técnicos entre malla N.º 8 y malla N.º 6 permite mejorar la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y favorecer el avance operativo continuo en una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026.

1.2. Objetivos de investigación

1.2.1. Objetivo general

Determinar en qué medida la optimización del sostenimiento geomecánico, mediante la comparación técnico-operativa entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6, mejora la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y contribuye al avance operativo continuo en una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso RMR 40 en las labores subterráneas evaluadas, considerando fracturamiento, discontinuidades, humedad, efectos post-voladura y desplazamiento del contorno rocoso.
- Evaluar el desempeño técnico y operativo de la malla electrosoldada N.º 8 como sostenimiento estandarizado, mediante indicadores de producción, costo directo, intervalo de cambio, tiempo de intervención y desplazamiento máximo.
- Comparar el comportamiento de la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6 para determinar diferencias en estabilidad geomecánica, continuidad operativa, costo anualizado y control de desplazamientos.

- Formular criterios técnicos de optimización para la selección y aplicación de la malla de sostenimiento en labores subterráneas con macizo rocoso RMR 40, orientados a reducir interrupciones y sostener el avance operativo continuo.

1.3. Preguntas de investigación

1.3.1. Problema general

¿En qué medida la optimización del sostenimiento geomecánico, mediante la comparación técnico-operativa entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6, mejora la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y contribuye al avance operativo continuo en una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las condiciones geomecánicas del macizo rocoso RMR 40 en las labores subterráneas evaluadas y cómo influyen en la selección de la malla de sostenimiento?
- ¿Cuál es el desempeño técnico y operativo de la malla electrosoldada N.º 8 frente a los efectos post-voladura, el desplazamiento del macizo, los costos y los tiempos de intervención?
- ¿Qué diferencias presentan la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6 en términos de estabilidad, producción, costos anualizados, intervalo de cambio y desplazamiento máximo?
- ¿Qué criterios técnicos deben considerarse para optimizar la selección y aplicación de la malla de sostenimiento en labores con macizo rocoso RMR 40?

1.4. Línea de investigación

Optimización de Procesos Mineros.

1.5. Palabras clave

- Sostenimiento geomecánico
- RMR 40

- Malla electrosoldada
- Desplazamiento del macizo rocoso
- Avance operativo continuo.

1.6. Solución propuesta

1.6.1. Justificación e importancia

La investigación se justifica porque las labores subterráneas con macizo rocoso RMR 40 presentan condiciones de estabilidad limitadas, especialmente después de la voladura. En este contexto, la selección de la malla de sostenimiento no debe responder únicamente a criterios de estandarización, sino a una evaluación técnica basada en el comportamiento real del macizo, la capacidad de retención de la malla, la frecuencia de reposición y la continuidad del ciclo operativo.

Desde el punto de vista técnico, el estudio permite comparar la malla electrosoldada N.º 8 con la malla electrosoldada N.º 6 a partir de indicadores medibles: producción diaria, costo directo, costo anualizado, intervalo de cambio, tiempo de intervención y desplazamiento máximo. Esta comparación permite identificar si un mayor costo inicial puede compensarse con menor deformación, mayor vida útil y menor frecuencia de mantenimiento.

Desde el punto de vista operativo, la investigación aporta criterios para reducir interrupciones no programadas, mejorar el control de desprendimientos y sostener la continuidad del avance minero. Los beneficiarios directos son el área de operaciones, geomecánica, seguridad y el personal de labores subterráneas. Como aporte metodológico, el estudio integra información geomecánica, operativa y económica para tomar decisiones de sostenimiento con mayor sustento técnico.

1.6.2. Descripción de la solución

La solución propuesta consiste en optimizar la selección y aplicación de la malla de sostenimiento mediante una comparación técnica entre la malla electrosoldada N.º 8 y la malla

electrosoldada N.º 6 en labores con macizo rocoso RMR 40. La propuesta no reemplaza el sistema integral de sostenimiento de la mina, sino que fortalece el criterio de selección de la malla superficial en función del comportamiento observado del macizo y de los indicadores operativos.

La optimización se sustenta en el análisis de cinco criterios principales: estabilidad del contorno rocoso, desplazamiento máximo, intervalo de cambio, tiempo de intervención y costo anualizado por reposición. A partir de estos criterios se propone que la malla N.º 6 sea considerada en zonas con mayor fracturamiento, mayor exposición a efectos post-voladura o mayor riesgo de caída de fragmentos, siempre que su instalación cumpla los estándares técnicos de traslape, fijación y control posterior.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Wu et al. (2024) tuvieron como objetivo desarrollar un sistema de clasificación de calidad del macizo rocoso para túneles profundos en roca dura, denominado DHRT-RMR, integrando el índice de tendencia a rockburst con el sistema RMR tradicional. La metodología combinó monitoreo micro-sísmico in situ, selección de parámetros mediante el proceso de jerarquía analítica y aplicación del sistema en dos sitios de prueba en un túnel del suroeste de China. Entre los resultados, el estudio reportó diferencias de comportamiento micro-sísmico entre masas rocosas con distintas calidades, registrando, por ejemplo, 167 eventos micro-sísmicos y energía acumulada de 3.24 lgE/J en un caso con velocidad de onda P de 6500 m/s, frente a 52 eventos y 2.59 lgE/J en otro caso con velocidad de onda P de 5300 m/s.

Terron-Almenara, Holter y Høien (2023) tuvieron como objetivo proponer una metodología híbrida para el diseño de sostenimiento en túneles de roca dura con condiciones de terreno pobre. La metodología integró criterios empíricos de clasificación geomecánica, análisis del comportamiento del terreno, revisión de práctica de sostenimiento y evaluación de 118 casos documentados de túneles, principalmente en condiciones noruegas. Los resultados evidenciaron que el diseño basado solo en métodos empíricos presenta limitaciones en terrenos pobres, debido a que las deformaciones y modos de falla varían según esfuerzos in situ, estructura del macizo y tipo de soporte instalado. El aporte para esta tesis consiste en respaldar la necesidad de comparar técnicamente el sostenimiento instalado, en lugar de mantener una malla estandarizada sin evaluar su desempeño frente a deformación, fracturamiento y continuidad del avance operativo.

Brousset, Pehovaz, Quispe, Raymundo y Moguerza (2023) tuvieron como objetivo mejorar la clasificación del macizo rocoso en minería subterránea peruana mediante redes

neuronales artificiales, reduciendo la incertidumbre generada por métodos empíricos tradicionales. La metodología consistió en recopilar datos de propiedades geomecánicas, entrenar redes neuronales con datos de entrada y salida asociados al índice RMR, y validar la capacidad del modelo para clasificar tipos de roca durante el diseño y avance de mina. Los resultados mostraron un margen de error de 0.279 % en la determinación del índice RMR, lo que evidencia alta precisión en la estimación geomecánica.

Chen, Yang, Zhang, Huang y Tian (2021) tuvieron como objetivo automatizar la clasificación de estructuras rocosas en frentes de túnel mediante aprendizaje profundo. La metodología utilizó redes neuronales convolucionales Inception-ResNet-V2 para clasificar cinco tipos de estructuras rocosas: mosaico, granular, estratificada, en bloques y fragmentada. El estudio trabajó con 42 400 imágenes extraídas de más de 150 secciones de frentes de túnel, empleando más de 35 000 imágenes para entrenamiento y 7400 para prueba. Los resultados evidenciaron que el modelo Inception-ResNet-V2 obtuvo el mejor desempeño frente a ResNet-50, ResNet-101 e Inception-v4, considerando precisión, recuperación, F-score y tiempo de prueba por imagen. Su aporte para esta investigación es metodológico, pues demuestra la importancia de reducir la subjetividad en la evaluación del macizo rocoso y de utilizar registros objetivos para decidir el tipo de sostenimiento superficial.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Arimana Rojas y Palomino Condori (2023) tuvieron como objetivo evaluar el efecto del estudio geomecánico del macizo rocoso en el diseño de sostenimiento de la zona de producción norte de la Unidad Minera Parcoy, La Libertad. La metodología fue aplicada, con uso de software geomecánico, clasificación del macizo rocoso y diseño experimental-relacional apoyado en pruebas estadísticas. Los resultados cuantitativos clasificaron la masa rocosa en Regular III-A con RMR 55, Regular III-B con RMR 47, Mala IV-A con RMR 41 y Mala IV-B con RMR 27; además, reportaron que el 50 % de accidentes mortales por desprendimiento

de roca ocurrió en zonas sin sostenimiento, el 26.5 % en áreas sostenidas con madera, el 10.1 % con split set, el 8.4 % con barras helicoidales y el 5 % con shotcrete, cables y pilares. Este antecedente aporta a la investigación porque evidencia que la calidad del macizo y el tipo de sostenimiento influyen directamente en la seguridad y continuidad operativa, aspecto central para comparar la malla electrosoldada N.º 8 y N.º 6.

Ticona Josec (2019) tuvo como objetivo realizar la evaluación geomecánica del macizo rocoso para diseñar el sostenimiento adecuado en la Galería de Acceso y Rampa 430-E de la empresa minera S.M. POWER S.A.C., en Puno. La metodología fue cuantitativa descriptiva, con cuatro estaciones geomecánicas en la galería y cuatro en la rampa, ensayos de resistencia a compresión simple, análisis de cuñas mediante Dips y estimación de estabilidad con Unwedge. Los resultados cuantitativos indicaron calidades RMR III-A y III-B, resistencia promedio de la roca pizarra de 84.9 MPa, cuñas críticas de 3 a 6 toneladas y factores de seguridad menores a 1. Como propuesta, el estudio diseñó sostenimiento con perno helicoidal de 2.0 m para roca III-A y perno helicoidal de 1.8 m con malla para roca III-B. El aporte a esta tesis consiste en demostrar que el sostenimiento debe variar según la condición geomecánica específica y el riesgo de inestabilidad, por lo que una malla estandarizada puede ser insuficiente en macizos críticos.

Salazar Isla (2020) tuvo como objetivo determinar cómo influye la evaluación geomecánica en la selección del tipo de sostenimiento en tajeos de explotación por corte y relleno ascendente en la Unidad Minera Yauricocha, Sociedad Minera Corona S.A. La metodología fue aplicada, descriptiva y de diseño cuasi-experimental, considerando como muestra el tajeo 0337, RP basculante, piso 0, nivel 1170, zona V, cuerpo Mascota. Los resultados cuantitativos, reportados mediante clasificación de Bieniawski, identificaron un macizo rocoso de clase II con valoración RMR de 74 puntos, recomendando pernos split set de 3 m en corona, espaciamiento de 2.5 m, malla electrosoldada y shotcrete ocasional. El aporte

para esta investigación es que confirma la utilidad del RMR como base para definir sostenimiento, pero también evidencia que la selección debe relacionarse con condiciones reales de labor, tipo de excavación y exigencia operativa.

2.1.3. Antecedentes locales

Díaz Chiguay, Huamani Montalvo, Macedo Franco y Velarde Lam (2025) tuvieron como objetivo proponer un modelo geomecánico para optimizar el diseño de una rampa minera en una mina de oro subterránea ubicada en Yanaquihua, Arequipa. La metodología consideró levantamiento geológico in situ, determinación del RQD, clasificación RMR, cálculo del índice Q de Barton, estimación GSI, ensayo con martillo Schmidt, carga puntual y compresión simple. Los resultados cuantitativos reportaron RQD de 72 puntos, resistencia estimada con martillo Schmidt de 125.6 MPa, RMR de 70, índice Q de 38.4, GSI de 65, resistencia promedio en compresión simple de 75 MPa y una mejora del 100 % en el modelo propuesto, debido a que el modelo actual consideraba solo 5 de 10 parámetros, mientras que el modelo propuesto incorporó la totalidad de ellos. El aporte para la presente tesis es que demuestra la necesidad de sustentar el diseño de sostenimiento y la continuidad operativa en un modelo geomecánico con parámetros medibles, no solo en la experiencia operativa.

Luza, Mango, Castillo, Cervantes, Ccalachua y Tunquipa (2023) tuvieron como objetivo caracterizar el macizo rocoso de las canteras de Añashuayco en Arequipa, con la finalidad de reconocer condiciones de estabilidad y riesgos asociados a la extracción de sillar. La metodología se basó en caracterización geológica, evaluación de campo y análisis del comportamiento del macizo rocoso. Los resultados señalaron problemas de inestabilidad geológica relacionados con taludes y posible caída de bloques, condición que evidencia la necesidad de criterios técnicos para controlar desprendimientos. Aunque su ámbito corresponde a canteras y no a labores subterráneas, el antecedente aporta porque refuerza que el comportamiento real del macizo debe orientar las medidas de estabilidad y no solo la práctica

extractiva habitual.

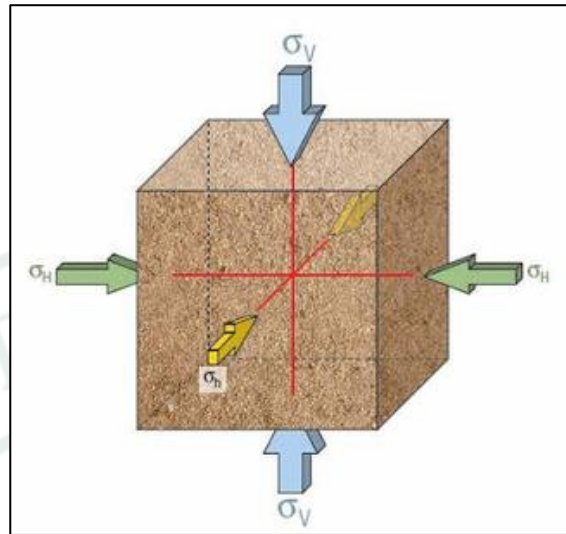
2.2. Bases teóricas de la investigación

2.2.1. Geomecánica aplicada a excavaciones subterráneas

La geomecánica aplicada a la minería subterránea estudia el comportamiento mecánico del macizo rocoso frente a procesos de excavación, redistribución de esfuerzos, presencia de discontinuidades, humedad, voladura y sostenimiento. Su finalidad principal es anticipar condiciones de inestabilidad, controlar desprendimientos y establecer sistemas de sostenimiento que permitan mantener la seguridad del personal y la continuidad del ciclo operativo. En una excavación subterránea, la roca deja de comportarse como un material intacto y pasa a actuar como un macizo compuesto por bloques, fracturas, juntas, fallas y zonas alteradas. Por ello, la estabilidad no depende únicamente de la resistencia de la roca, sino también de la orientación, persistencia, rugosidad, relleno y separación de las discontinuidades, así como de la acción del agua y de los esfuerzos inducidos por la excavación.

En labores subterráneas con RMR 40, la geomecánica adquiere mayor importancia porque el macizo se ubica en una condición de calidad baja o límite inferior de estabilidad, donde el fracturamiento y la deformación del contorno pueden generar desprendimientos después de las voladuras. En este contexto, el sostenimiento superficial mediante malla electrosoldada debe evaluarse no solo por su costo de instalación, sino por su capacidad para retener fragmentos, controlar desplazamientos, reducir intervenciones correctivas y sostener el avance operativo continuo. Por tanto, la evaluación geomecánica constituye la base técnica para decidir si la malla N.º 8 resulta suficiente o si la malla N.º 6 ofrece mejor desempeño técnico-operativo.

Figura 1.
Concepto de Geomecánica



Nota. Elaboración propia con base en criterios generales de geomecánica aplicada a excavaciones subterráneas.

2.2.2. Macizo rocoso y parámetros geomecánicos

El macizo rocoso es el conjunto natural formado por roca intacta y discontinuidades. A diferencia de una muestra de laboratorio, el macizo presenta heterogeneidad, anisotropía y variabilidad espacial, por lo que su comportamiento depende de la interacción entre resistencia de la roca, grado de fracturamiento, orientación de juntas, presencia de agua, alteración y esfuerzos actuantes. Para caracterizarlo se emplean parámetros como resistencia a compresión simple, RQD, espaciamiento de discontinuidades, condición de juntas, orientación de discontinuidades, índice RMR, índice Q y GSI. Estos parámetros permiten estimar la calidad del macizo y definir el sostenimiento más adecuado para cada labor.

El RQD permite estimar el grado de fracturamiento a partir de la recuperación de testigos sanos mayores de 10 cm, mientras que el RMR integra varios factores geomecánicos para obtener una valoración global del macizo. En labores mineras, estos índices deben complementarse con observación directa, registro de desprendimientos, medición de desplazamientos y seguimiento posterior a la voladura. Esto es importante porque dos labores con valores RMR similares pueden comportarse de manera distinta si presentan diferencias en humedad, orientación de discontinuidades, daño por voladura o calidad de instalación del

sostenimiento.

2.2.3. Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

El sistema Rock Mass Rating (RMR), desarrollado por Bieniawski, es uno de los métodos empíricos más utilizados para clasificar la calidad del macizo rocoso y orientar el diseño preliminar del sostenimiento. El sistema considera parámetros como resistencia de la roca intacta, RQD, espaciamiento de discontinuidades, condición de discontinuidades, presencia de agua y orientación de las discontinuidades respecto a la excavación. La valoración final permite agrupar el macizo en clases de calidad que orientan el tipo de soporte requerido.

Según la escala clásica de RMR, los rangos se interpretan de la siguiente manera: 81-100 corresponde a roca muy buena, 61-80 a roca buena, 41-60 a roca regular, 21-40 a roca mala y valores menores a 20 a roca muy mala. En consecuencia, un macizo con RMR 40 debe considerarse como roca mala o condición crítica de clase IV, no como roca regular. Esta precisión es importante para la presente investigación, debido a que el comportamiento esperado de un macizo RMR 40 incluye mayor susceptibilidad a desprendimientos, menor autosoporte, mayor necesidad de sostenimiento sistemático y mayor control posterior a la voladura.

Figura 2.
Clasificación RMR

Clase Macizo Rocoso	Descripción	RMR
I	Macizo rocoso de excelente calidad	81-100
II	Macizo rocoso de buena calidad	61-80
III	Macizo rocoso de calidad regular	41-60
IV	Macizo rocoso de mala calidad	21-40
V	Macizo rocoso de muy mala calidad	0-20

Nota. Adaptado de Bieniawski (1989). Los trabajos de voladura deficientes pueden afectar la calidad del macizo

rocoso y reducir su comportamiento geomecánico.

La clasificación RMR tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- La resistencia uniaxial de la matriz rocosa. Se mide a partir del ensayo de rotura a compresión simple de testigos de rocas o a partir del ensayo de carga puntual. La puntuación va desde 0 hasta 15 puntos dependiendo de la resistencia de la roca.
- El grado de fracturación en parámetros del RQD. Valora el grado de fracturación del macizo según el universalmente conocido RQD desde 3 puntos para un valor de RQD inferior al 25% hasta 20 puntos para un valor de RQD superior al 90%.
- El espaciado de las discontinuidades (planos de debilidad). Como bien dice el enunciado puntúa el espaciamiento entre discontinuidades. La puntuación alcanza valores de 20 puntos para diaclasas separadas más de 2 m y un valor mínimo de 5 para diaclasas espaciadas menos de 6 cm.
- Las condiciones de las discontinuidades. Permite puntuar el estado de las diaclasas a través de persistencia o longitud de las discontinuidades, abertura, rugosidad, presencia de relleno y alteración de las juntas. El valor máximo es de 20 puntos mientras que el mínimo es de 0 puntos.
- Parámetros o condiciones hidrogeológicas. Mide las filtraciones de agua en el macizo, el flujo de agua y la humedad presente en las discontinuidades. La puntuación alcanza un valor de 15 para un macizo rocoso seco y un valor de 0 para cuando el agua está fluyendo entre las juntas con un caudal superior a 125 l/min o la relación presión de agua/tensión principal mayor es superior a 0,5.
- La orientación de las discontinuidades con respecto a la estructura de excavación. Se aplica un coeficiente de corrección dependiendo de la dirección y el buzamiento, así como de la utilidad proyectada del macizo.

2.2.4. Técnicas de Sostenimiento Geomecánico

El sostenimiento geomecánico es un conjunto de métodos utilizados para mantener la estabilidad de las excavaciones subterráneas. Dependiendo de la clasificación del macizo rocoso, se utilizan diversas técnicas, que se detallan a continuación.

Shotcrete (Concreto Proyectado)

El shotcrete es un tipo de concreto que se proyecta a alta velocidad sobre las paredes de la excavación para aumentar la estabilidad. Esta técnica se utiliza principalmente en minas con RMR entre 40-60, donde el macizo rocoso presenta un comportamiento regular. El shotcrete, aplicado en combinación con mallas metálicas o fibras, mejora la resistencia y la cohesión de las superficies rocosas.

Ventajas del shotcrete:

- Rapidez de aplicación: Puede aplicarse de forma rápida, cubriendo grandes áreas.
- Versatilidad: Se adapta a geometrías irregulares de las excavaciones.
- Refuerzo adicional: Puede combinarse con mallas metálicas para mejorar la resistencia.

Desventajas:

- Requiere personal especializado.
- La calidad depende de la correcta aplicación del material.

Figura 3.
Shotcrete



Nota. Imagen referencial del concreto proyectado como técnica de sostenimiento en excavaciones subterráneas.

Pernos de Anclaje (Pernos de Roca)

Los pernos de anclaje son utilizados para reforzar la roca y mejorar la estabilidad de las excavaciones. Se instalan a través de las discontinuidades del macizo rocoso y se anclan en la roca sólida. Los pernos pueden ser de acero o de fibra y ayudan a evitar deslizamientos o caídas de roca.

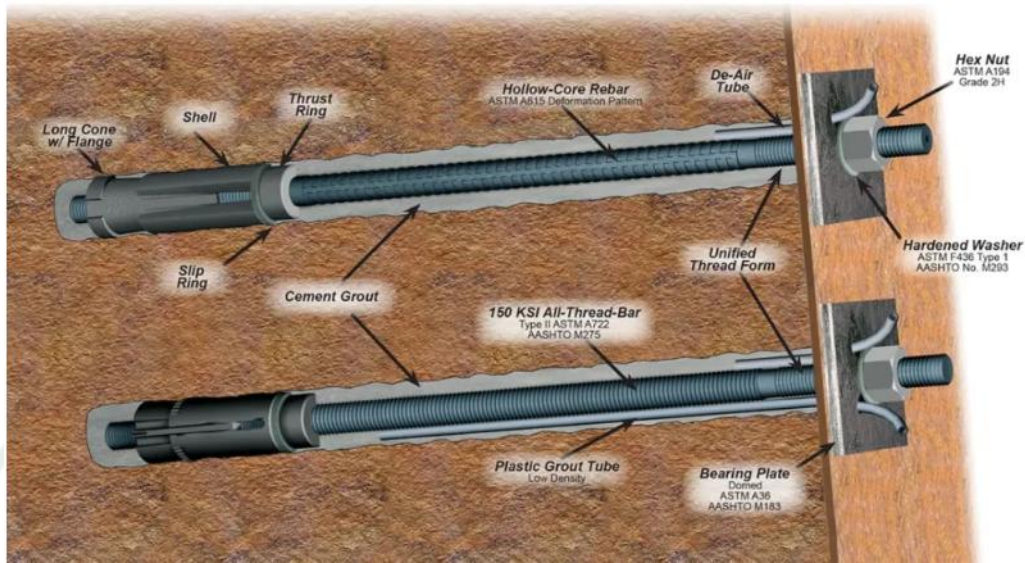
Ventajas de los pernos de anclaje:

- Alta resistencia: Proporcionan un soporte fuerte y duradero.
- Flexibilidad: Se adaptan a las características específicas de la mina.
- Reducción de costos operativos: Mejoran la estabilidad, lo que disminuye los tiempos de inactividad y los costos de mantenimiento.

Desventajas:

- Requiere perforación de los taladros en el macizo rocoso.
- Costos iniciales relativamente altos.

Figura 4.
Pernos de roca



Nota. Imagen referencial del sistema de pernos de roca empleado como elemento de refuerzo en excavaciones subterráneas.

Mallas Metálicas

Las mallas metálicas se utilizan para cubrir las superficies de las excavaciones y distribuir las tensiones sobre las paredes rocosas. Son una forma de refuerzo adicional que se combina con otros sistemas de sostenimiento como los pernos y el shotcrete.

Ventajas de las mallas metálicas:

- Refuerzo eficaz: Ayuda a distribuir las tensiones sobre las superficies.
- Fácil instalación: Se pueden adaptar fácilmente a las excavaciones subterráneas.
- Costo relativamente bajo: Comparado con otras técnicas de sostenimiento.

Desventajas:

- Pueden ser menos efectivas en rocas con alto grado de fracturación.
- Su durabilidad depende del mantenimiento adecuado.

Figura 5.
Enmallado subterráneo



Nota. Imagen referencial del enmallado subterráneo como sistema de retención superficial del macizo rocoso.

Malla Galvanizada T- 60: El alambre de acero galvanizado presenta un límite elástico superior en comparación con los alambres convencionales, lo que le permite soportar cargas más elevadas antes de alcanzar el punto de ruptura por metro cuadrado. En el sector minero, se utilizan mallas con diversos diámetros que varían desde 30 g/m² hasta 610 g/m², siendo estas últimas reconocidas por su durabilidad prolongada.

Malla Electrosoldada T-80: Las mallas electrosoldadas se componen de varillas lisas o corrugadas, que han sido laminadas en frío y organizadas en formas cuadradas o rectangulares. Estas mallas están formadas por barras longitudinales y transversales que se cruzan en ángulos rectos, siendo soldadas eléctricamente en sus puntos de intersección. Este proceso permite una adecuada distribución de las cargas en el elemento estructural.

Sistemas Híbridos de Sostenimiento

Los sistemas híbridos combinan diferentes técnicas de sostenimiento (pernos, shotcrete y mallas metálicas) para proporcionar el máximo refuerzo en condiciones geomecánicas

complejas, como las de RMR 40. Estos sistemas son ideales para minas con un comportamiento inestable en zonas específicas.

Ventajas de los sistemas híbridos:

- Máxima eficiencia: La combinación de técnicas proporciona un refuerzo integral.
- Seguridad mejorada: Reduce los riesgos de desprendimientos y colapsos.
- Adaptabilidad: Se ajusta a las condiciones particulares de cada mina.

Desventajas:

- Requiere planificación y análisis detallado para asegurar la efectividad de cada componente.
- Involucra mayores costos iniciales y de instalación.

2.2.5. Efectos de la voladura sobre la estabilidad del macizo rocoso

La perforación y voladura modifican el estado de esfuerzos del contorno excavado y pueden generar daño inducido en la roca circundante. Cuando la voladura no se controla adecuadamente, se incrementa el fracturamiento, se amplían discontinuidades preexistentes, se producen vibraciones y se favorece el desprendimiento de bloques. En macizos de baja calidad, como los asociados a RMR 40, estos efectos pueden manifestarse mediante deformaciones visibles, caída de fragmentos, necesidad de desatado, reposición de malla y reducción de la continuidad operativa.

El análisis post-voladura es indispensable para evaluar el desempeño del sostenimiento. La malla instalada debe ser capaz de adaptarse al contorno irregular, retener fragmentos desprendidos y trabajar conjuntamente con pernos y otros elementos de soporte. Si el sostenimiento superficial presenta deformaciones excesivas, rotura de alambres, desprendimiento de fijaciones o reducción rápida de su vida útil, se incrementan los tiempos de intervención y se afecta el ciclo perforación-voladura-limpieza-sostenimiento. Por ello, el

comportamiento frente a la voladura constituye un criterio técnico central en la optimización de la malla.

2.2.6. Sostenimiento geomecánico en minería subterránea

El sostenimiento geomecánico comprende el conjunto de elementos y procedimientos destinados a mantener la estabilidad de las excavaciones subterráneas. Puede incluir pernos de roca, mallas metálicas, shotcrete, cables, cimbras y sistemas combinados. La elección depende de la calidad del macizo, la sección de la labor, el tiempo de exposición, los esfuerzos actuantes, el método de minado, la presencia de agua y el nivel de seguridad requerido. En labores con macizo RMR 40, el sostenimiento debe controlar desprendimientos superficiales y contribuir a reducir la deformación del contorno.

Los pernos cumplen una función de refuerzo al anclar bloques o estratos hacia zonas más competentes del macizo. El shotcrete actúa como soporte superficial continuo y contribuye a confinar la superficie rocosa. La malla metálica, por su parte, cumple una función de retención y control superficial, evitando que fragmentos desprendidos alcancen la zona de tránsito o trabajo. La eficacia del sistema depende de la interacción adecuada entre estos elementos y de la calidad de instalación, especialmente en traslapes, tensión de la malla, fijación con pernos y cobertura del contorno.

2.2.7. Malla electrosoldada como elemento de sostenimiento superficial

La malla electrosoldada está conformada por alambres o varillas de acero dispuestos en forma longitudinal y transversal, unidos mediante soldadura en sus intersecciones. En minería subterránea se utiliza para cubrir el contorno excavado y retener fragmentos de roca desprendidos entre puntos de anclaje. Su desempeño depende del diámetro o calibre del alambre, la abertura o cocada, la resistencia del acero, la calidad de soldadura, el traslape entre paños, la fijación y la adaptación al perfil de la excavación.

En términos técnicos, una malla de mayor calibre y menor abertura puede ofrecer mayor capacidad de retención superficial, porque reduce la posibilidad de paso de fragmentos y mejora la distribución de esfuerzos entre puntos de anclaje. En la presente investigación, la malla electrosoldada N.º 8 con cocada 4"x4" constituye la condición base o sistema estandarizado, mientras que la malla electrosoldada N.º 6 con cocada 3"x3" constituye la alternativa de optimización. La comparación entre ambas debe centrarse en indicadores medibles: desplazamiento máximo, intervalo de cambio, tiempo de intervención, producción, costo directo y costo anualizado.

2.2.8. Criterios técnicos para la selección de malla de sostenimiento

La selección de una malla de sostenimiento no debe basarse únicamente en el precio unitario por metro cuadrado. En labores subterráneas con macizo RMR 40, el criterio económico debe integrarse con criterios técnicos y operativos. Entre los principales criterios se encuentran: capacidad de retención de fragmentos, resistencia frente a deformación del contorno, comportamiento posterior a la voladura, facilidad de instalación, frecuencia de mantenimiento, intervalo de reposición, compatibilidad con pernos y shotcrete, disponibilidad operativa y seguridad del personal.

El costo directo puede ser mayor en una malla de mayor calibre; sin embargo, si esta incrementa la vida útil, reduce desplazamientos y disminuye reposiciones, puede generar un menor costo anualizado. Por ello, la comparación entre malla N.º 8 y N.º 6 debe incorporar el indicador de costo anualizado por reposición, entendido como la relación entre costo de sostenimiento y vida útil esperada. Este enfoque permite evitar decisiones erróneas basadas únicamente en el costo inicial y permite evaluar la sostenibilidad operativa del sistema.

2.2.9. Desplazamiento del macizo rocoso y control de deformaciones

El desplazamiento del macizo rocoso es un indicador directo del comportamiento de la excavación y del nivel de deformación que experimenta el contorno. En labores con macizos

fracturados, el desplazamiento puede estar asociado a apertura de discontinuidades, relajación de esfuerzos, daño por voladura, pérdida de confinamiento o insuficiencia del sostenimiento. Cuando el desplazamiento es elevado, aumenta la probabilidad de desprendimientos, rotura de malla, caída de bloques y necesidad de intervención correctiva.

El control de desplazamientos permite evaluar objetivamente la eficacia del sostenimiento. Una reducción del desplazamiento máximo indica mayor estabilidad relativa del contorno y menor demanda de mantenimiento. En esta investigación, el desplazamiento máximo constituye un indicador esencial para comparar el desempeño de la malla N.º 8 y la malla N.º 6. Si la malla N.º 6 reduce la deformación y mantiene mayor continuidad del ciclo operativo, puede considerarse una alternativa técnicamente más favorable, incluso si su costo inicial es superior.

2.2.10. Avance operativo continuo

El avance operativo continuo se refiere a la capacidad de la operación minera para mantener el ciclo de perforación, voladura, ventilación, limpieza, sostenimiento y acarreo sin interrupciones significativas por fallas geomecánicas o mantenimiento no programado. En minería subterránea, la continuidad operativa depende de la estabilidad de las labores, la disponibilidad de equipos, la seguridad del personal y la eficiencia del sostenimiento instalado. Cuando el sostenimiento falla o requiere reposición frecuente, se generan tiempos improductivos que reducen producción y elevan costos.

2.2.11. Optimización del sostenimiento geomecánico

La optimización del sostenimiento geomecánico consiste en seleccionar y aplicar el sistema que brinde mejor equilibrio entre estabilidad, seguridad, continuidad operativa y costo. Optimizar no significa necesariamente utilizar el material más barato, sino aquel que reduzca fallas, disminuya intervenciones, prolongue la vida útil y permita mantener el avance de la operación. En labores con RMR 40, la optimización debe estar sustentada en evidencia de

campo, registros de producción, costos, medición de desplazamientos, evaluación post-voladura y análisis del intervalo de reposición.

2.2.12. Definición de variables

Variable Independiente: Optimización del sostenimiento geomecánico

La optimización del sostenimiento geomecánico se refiere a la selección y aplicación técnica de la malla de sostenimiento en función de las condiciones del macizo rocoso, la respuesta post-voladura, el desplazamiento máximo, el intervalo de cambio, el tiempo de intervención, el costo directo y el costo anualizado. En la presente investigación, esta variable se analiza mediante la comparación entre la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6, con el fin de determinar cuál presenta mejor desempeño técnico-operativo en labores subterráneas con macizo rocoso RMR 40 (Bieniawski, 1989).

Variable Dependiente: Avance operativo continuo

El avance operativo continuo se refiere a la capacidad de mantener el ciclo de perforación, voladura, limpieza y sostenimiento sin interrupciones significativas generadas por fallas geomecánicas, desprendimientos, deformaciones excesivas o reposiciones frecuentes del sostenimiento. En esta investigación, se evalúa mediante indicadores de producción, continuidad operativa, tiempo de intervención, intervalo de reposición, desplazamiento máximo e índice producción/desplazamiento. (Hernández et al., 2023).

2.3. Hipótesis

La optimización del sostenimiento geomecánico mediante la aplicación de criterios técnico-operativos de selección entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6 mejora significativamente la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y el avance operativo continuo en una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026.

2.4. Variables

Tabla 1.
Matriz de Operacionalización de variables

Variable dependiente	Indicadores	Categoría	Instrumentos
Avance operativo continuo	Producción	Producción diaria promedio (TPD)	Registros de producción
	Continuidad operativa	Frecuencia de intervención, tiempo improductivo, intervalo de reposición	Reportes operativos y de mantenimiento
	Eficiencia operativa	Índice producción/desplazamiento (TPD/mm)	Base comparativa de indicadores
	Seguridad y estabilidad operacional	Control de desprendimientos, deformación visible, respuesta post-voladura	Observación directa, reportes de seguridad y geomecánica
Variable independiente	Indicadores	Categoría	Instrumentos
Optimización del sostenimiento geomecánico	Condición geomecánica del macizo	RMR, fracturamiento, discontinuidades, humedad, efectos post-voladura	Registros geomecánicos, informes de voladura, observación directa
	Características del sostenimiento	Tipo de malla, calibre, cocada, capacidad de retención, instalación	Ficha técnica de malla, reportes de sostenimiento
	Desempeño del sostenimiento	Desplazamiento máximo (mm), intervalo de cambio (años), tiempo de intervención (h)	Fichas de campo, registros de mantenimiento
	Eficiencia económica	Costo directo (USD/m ²), costo anualizado (USD/m ² -año)	Registros de costos, hojas de cálculo



CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Alcance y limitaciones

3.1.1. Alcance

La presente investigación se desarrolla en el ámbito de la minería subterránea, enfocándose en labores con macizo rocoso clasificado como RMR 40 en una unidad minera de la región de Pasco. El análisis utiliza información operativa registrada durante el periodo julio-setiembre de 2025 y formula una propuesta técnica de aplicación para el periodo 2026. El estudio se centra en la optimización del sostenimiento geomecánico mediante la comparación entre la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6, evaluando su desempeño frente a los efectos de la voladura, el desplazamiento del macizo rocoso y la continuidad del avance operativo.

Se analizarán las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, considerando fracturamiento, discontinuidades, estabilidad de la excavación, desprendimientos y deformaciones visibles. Además, se evaluará la efectividad del sostenimiento posterior a voladuras, incluyendo tiempos de mantenimiento, frecuencia de reposición y control de caída de rocas.

El estudio integrará información operativa de los ciclos de perforación, voladura, limpieza y sostenimiento, y se propondrá una alternativa de optimización mediante la malla N.º 6, buscando mejorar la estabilidad geomecánica y reducir interrupciones operativas. El producto final será una propuesta técnica basada en criterios técnicos y operativos para evaluar y mejorar la selección de la malla de sostenimiento, limitada a condiciones geomecánicas específicas, sin reemplazar todos los sistemas existentes.

3.1.2. Limitaciones

La investigación presenta limitaciones relacionadas con la disponibilidad y calidad de la información, dependiente de registros geomecánicos, reportes de sostenimiento, informes de

voladura y datos de mantenimiento. La ausencia de datos completos se complementará mediante observación directa y recolección durante el periodo de estudio.

El ámbito geográfico y espacial se limita a una unidad minera subterránea ubicada en Pasco, por lo que los resultados no deben generalizarse de manera directa a otras operaciones con condiciones geomecánicas diferentes. Asimismo, el análisis se limita al periodo julio-setiembre de 2025, por lo que no incorpora comportamientos de largo plazo como deterioro progresivo de la malla, variaciones estacionales del macizo o cambios operativos posteriores.

Se consideran también limitaciones económicas y de recursos, dado que no se contemplan inversiones en equipos especializados de monitoreo ni ensayos de laboratorio complejos. Por último, se reconoce la variabilidad geomecánica del macizo, que puede afectar el desempeño de la malla N° 8, limitando el análisis integral a los elementos directamente relacionados con su desempeño.

3.2. Aporte

El aporte de esta investigación radica en proporcionar criterios técnicos y operativos para optimizar la selección y aplicación de la malla de sostenimiento en minas subterráneas con macizo RMR 40. Se evaluará el desempeño de la malla N° 8 frente a voladuras y desplazamiento del macizo, y se comparará con la malla N° 6, considerando resistencia, control de desprendimientos, frecuencia de mantenimiento y continuidad del avance operativo.

Desde el enfoque técnico, se establecerán criterios de evaluación para mejorar la estabilidad del macizo, el control de caída de rocas y la efectividad del sostenimiento. En el ámbito operativo, la investigación contribuye a reducir interrupciones en los ciclos de minado y optimizar el uso de recursos. Finalmente, desde el enfoque metodológico, el estudio ofrece un esquema sistemático para relacionar la clasificación geomecánica RMR 40 con el comportamiento del sostenimiento, sirviendo como referencia para otras operaciones subterráneas con condiciones similares y fortaleciendo la seguridad y la eficiencia de la unidad

minera.

3.3. Tipo y nivel de investigación

3.3.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, porque busca resolver un problema técnico-operativo concreto relacionado con la selección de la malla de sostenimiento en labores subterráneas con macizo rocoso RMR 40.

3.3.2. Nivel de investigación

El nivel es comparativo-explicativo, debido a que contrasta el desempeño de la malla N.º 8 y la malla N.º 6, y explica cómo sus diferencias inciden en la estabilidad del macizo, el desplazamiento, la producción, los costos y la continuidad operativa.

3.3.3. Diseño de investigación

El diseño es no experimental, longitudinal, comparativo y de campo. Es no experimental porque no se manipulan deliberadamente las condiciones geomecánicas del macizo, sino que se analizan datos registrados en condiciones reales de operación. Es longitudinal porque los indicadores se evalúan en distintos periodos. Es comparativo porque se contrastan dos alternativas de malla, y es de campo porque los datos proceden de labores subterráneas de la unidad minera.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población está conformada por las labores subterráneas de una unidad minera ubicada en Pasco, en las que se desarrollan actividades de perforación, voladura, limpieza y sostenimiento bajo condiciones geomecánicas asociadas a macizo rocoso RMR 40.

3.4.2. Muestra

La muestra está constituida por las labores seleccionadas de manera no probabilística intencional que cumplen los siguientes criterios: presencia de macizo rocoso RMR 40, uso de

mallas electrosoldadas N.º 8 como condición base, posibilidad de comparación con mallas electrosoldadas N.º 6, exposición a procesos de voladura y disponibilidad de registros de producción, costos, mantenimiento, intervención y desplazamiento.

3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

El método empleado es analítico-comparativo, debido a que se examinan los indicadores técnicos y operativos de dos sistemas de sostenimiento para determinar cuál presenta mejor desempeño frente a las condiciones del macizo rocoso RMR 40. Asimismo, se utiliza el método deductivo, porque el análisis parte de criterios geomecánicos generales sobre estabilidad, deformación y sostenimiento, para aplicarlos al caso específico de las labores subterráneas evaluadas.

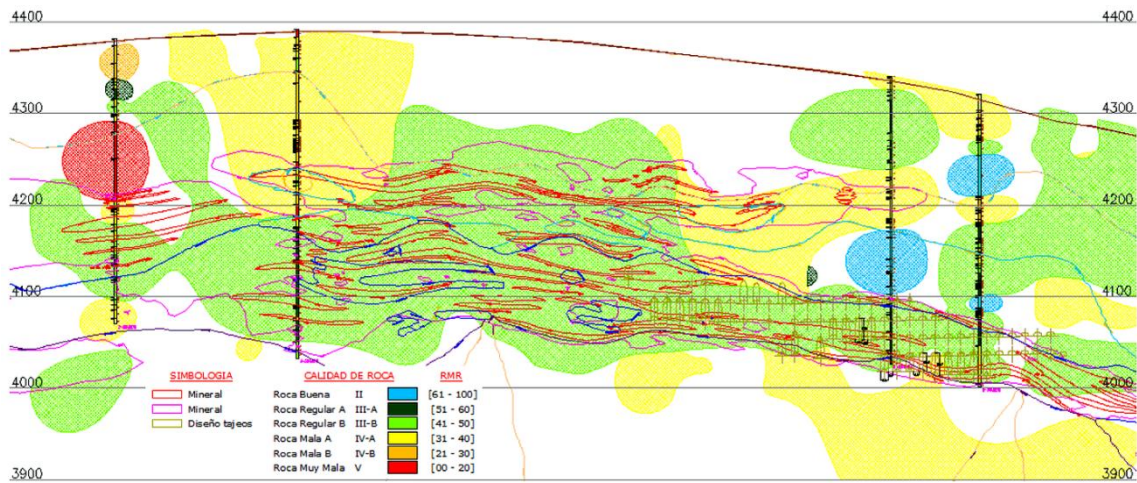
Las técnicas empleadas son observación directa, revisión documental, análisis de registros geomecánicos, revisión de reportes de voladura, análisis de registros de producción y evaluación comparativa de indicadores técnicos y operativos. Los instrumentos son fichas de registro de campo, reportes de sostenimiento, informes geomecánicos, registros de producción, reportes de mantenimiento, informes de voladura y hojas de cálculo para procesamiento estadístico.

3.6. Plan de desarrollo de la investigación

La presente investigación se llevará a cabo en labores subterráneas ubicadas entre los niveles 4022 y 4055 de la unidad minera, donde el macizo rocoso presenta una clasificación geomecánica con valores de RMR 40, correspondiente a una roca de clase DE-IVA o de mala calidad. Estas condiciones geomecánicas se caracterizan por presentar mayor fracturamiento, presencia de discontinuidades, menor estabilidad del contorno rocoso y mayor susceptibilidad a desplazamientos o desprendimientos tras los procesos de perforación y voladura.

Figura.

Zonificación geomecánica transversal en las Zona SW y SE



Nota. Tomado de Informe Evaluación Geomecánica de Minado

Figura 6.

Zonificación geomecánica y calidades de masa rocosa

Zona	Zona	Promedio RMR	Calidad RMR	Dominio Estructural
N	Caja techo	25	Mala B	DE-IVB
	Mineral	35	Mala A	DE-IVA
		25	Mala B	DE-IVB
SW	Caja techo	35	Mala A	DE-IVA
	Mineral	55	Regular A	DE-III A
		45	Regular B	DE-III B
SE	Caja techo	35	Mala A	DE-IVA
	Mineral	55	Regular A	DE-III A
		45	Regular B	DE-III B
		35	Mala A	DE-IVA

Nota. Tomado de Informe Evaluación Geomecánica de Minado

El estudio se desarrolló mediante un análisis comparativo entre dos sistemas de sostenimiento con malla electrosoldada. La primera condición corresponde al sostenimiento previamente utilizado en la operación, conformado por malla electrosoldada calibre N.º 8 con cocada 4"x4", cuyos datos fueron registrados durante los meses de julio, agosto y setiembre de 2025. La segunda condición corresponde a la propuesta de mejora, conformada por malla electrosoldada calibre N.º 6 con cocada 3"x3", evaluada durante el mismo periodo, con la finalidad de comparar ambos sistemas bajo condiciones operativas equivalentes.

Para el desarrollo de la investigación se ejecutaron las siguientes etapas: revisión documental y técnica de registros geomecánicos, reportes de sostenimiento, informes de

voladura, datos de mantenimiento, registros de producción y mediciones de desplazamiento; toma de datos de línea base con malla N.º 8; evaluación de la malla N.º 6 en labores seleccionadas; comparación de indicadores técnicos y operativos; y formulación de criterios de optimización para la selección de la malla de sostenimiento.

Figura 7.

Instalación de malla electrosoldada N° 8

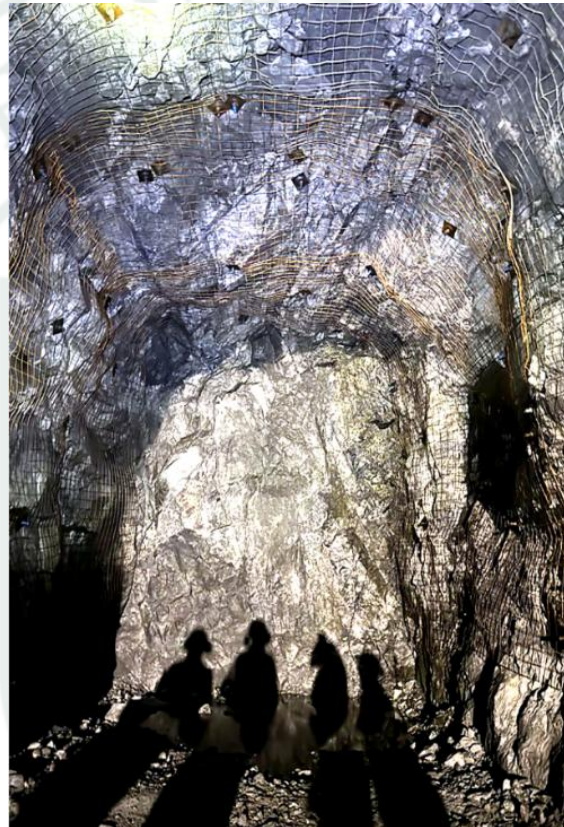


Figura 8.

Sostenimiento de malla N° 8



Figura 9.

Instalación de malla N° 6



Figura 10.

Sostenimiento de malla N° 6



El análisis comparativo consideró producción, costo directo, costo anualizado, intervalo de cambio, tiempo de intervención y desplazamiento máximo del macizo rocoso. Estos indicadores permitieron determinar si la malla N.º 6 mejora la estabilidad geomecánica y favorece la continuidad del avance operativo frente a la malla N.º 8.

Para llevar a cabo esta investigación, se ejecutarán las siguientes etapas:

- **Revisión documental y técnica:** Se recopilarán registros geomecánicos de las labores ubicadas entre los niveles 4022 y 4055, reportes de sostenimiento, informes de voladura, datos de mantenimiento, registros de producción y mediciones de desplazamiento. Esta información permitirá confirmar que las labores evaluadas presentan condiciones geomecánicas comparables, dentro del RMR 40.
- **Toma de datos de línea base (Malla N° 8):** Durante los meses de julio, agosto y setiembre de 2025, se registrará el comportamiento del sostenimiento con malla N° 8. Esta fase proporcionará los valores base para evaluar la producción, costo, intervalo de

reposición, mantenimiento y control del desplazamiento.

- **Implementación de Malla N° 6:** En labores seleccionadas dentro de los mismos niveles de estudio, se instalará la Malla Electrosoldada Calibre N° 6. Esta fase se llevará a cabo en condiciones geomecánicas equivalentes a las de la malla N°8 para evitar que la comparación se vea afectada por diferencias en la calidad del macizo rocoso. Se controlará la instalación, la respuesta frente a la voladura, la capacidad de retención y el comportamiento ante desplazamientos del terreno.
- **Toma de datos posterior a la implementación de Malla N° 6:** Durante los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2025, se registrarán los mismos indicadores utilizados durante la línea base para la malla N° 8, con el fin de realizar una comparación técnica homogénea entre ambos sistemas de sostenimiento.
- **Análisis comparativo de resultados:** Se contrastarán los valores obtenidos con la malla N° 8 y la malla N° 6 para identificar cuál sistema de sostenimiento es más eficiente en términos de producción, duración, costos, necesidad de reposición y desplazamiento del macizo rocoso. Se determinará si la malla N° 6 mejora la estabilidad y favorece la continuidad del avance operativo, a pesar de que pueda implicar mayor costo directo o mayor tiempo de mantenimiento.
- **Análisis comparativo de resultados:** Se contrastarán los valores obtenidos con la malla N° 8 y la malla N° 6 para identificar cuál sistema de sostenimiento es más eficiente en términos de producción, duración, costos, necesidad de reposición y desplazamiento del macizo rocoso. Se determinará si la malla N° 6 mejora la estabilidad y favorece la continuidad del avance operativo, a pesar de que pueda implicar mayor costo directo o mayor tiempo de mantenimiento.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se formulará una propuesta de optimización del sostenimiento geomecánico para labores subterráneas. Esta propuesta se orientará a mejorar

la estabilidad de la excavación, reducir fallas asociadas al sostenimiento y garantizar un avance operativo más continuo y seguro.





CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Procedimiento de trabajo

Con la definición de los rangos y parámetros de prueba utilizados en la presente investigación, se obtuvo los siguientes:

Tabla 2.
Parámetros y unidades

Descripción	Unidad	Malla N°08	Malla N°06
Producción	TPD	11000	13500
Costo	USD/m2	15.58	17.58
Intervalo de Cambio	años	1.5	3.0
Tiempo de instalación	Horas	1.5	2.2
Desplazamiento máximo	mm	10	5

Nota. Promedios de datos recopilados

4.1.1. Recopilación de datos

Con los datos recopilados de la zona de trabajo, con mapeo geomecánico con RMR IVA, se hace la revisión de los datos de estabilidad, inspecciones pasadas y durante el proceso de sostenimiento de estudio.

Los resultados de instalación de las mallas de sostenimiento, ase registro en horas en la siguiente tabla:

Tabla 3.
Tiempo de sostenimiento de malla N° 8

Fecha	Tiempo de sostenimiento (h)
1/07/2025	1.5
2/07/2025	1.5
3/07/2025	1.5
4/07/2025	1.5
5/07/2025	1.5
6/07/2025	1.5
7/07/2025	1.5
8/07/2025	1.5
9/07/2025	1.5
10/07/2025	1.5
11/07/2025	1.5
12/07/2025	1.5
13/07/2025	1.5

14/07/2025	1.5
15/07/2025	1.5

Con la inspección y análisis de los tipos de sistema de sostenimiento usados, se verifica las condiciones como efectividad y daño o fallo que se llegase a presentar, según características geotécnicas de la zona intervenida.

Con los datos obtenidos, se pudo tomar como resultados de la malla electrosoldada N° 8, serán:

Tabla 4.
Desplazamiento de malla N° 8

Fecha	Desplazamiento máximo
1/07/2025	10.00
2/07/2025	10.00
3/07/2025	10.00
4/07/2025	10.00
5/07/2025	10.00
6/07/2025	10.00
7/07/2025	10.00
8/07/2025	9.98
9/07/2025	10.00
10/07/2025	10.00
11/07/2025	10.00
12/07/2025	10.00
13/07/2025	10.00
14/07/2025	9.99
15/07/2025	10.00

Tras los datos obtenidos, con distintos tipos de refuerzo de sostenimiento, se pudo obtener la proyección en año de la malla electrosoldada N°8.

Tabla 5.
Proyección de duración de malla N° 8

Fecha	Intervalo de Cambio
1/07/2025	1.5
2/07/2025	1.5
3/07/2025	1.5
4/07/2025	1.5
5/07/2025	1.5
6/07/2025	1.5
7/07/2025	1.5
8/07/2025	1.5
9/07/2025	1.5

10/07/2025	1.5
11/07/2025	1.5
12/07/2025	1.5
13/07/2025	1.5
14/07/2025	1.5
15/07/2025	3

4.1.2. Propuesta de optimización del sistema de sostenimiento

Mediante la observación de campo, se brindó la propuesta de mejora de un sector mediante la malla electrosoldada N° 6, para su evaluación de la viabilidad técnica y económica, para el aseguramiento del cumplimiento de los criterios de seguridad y estabilidad del macizo rocoso.

Con la implementación un sector con la malla propuesta, y con el monitoreo continuo para la detección de la malla N°6 sin comprometer la estabilidad, se obtuvo los siguientes resultados de los parámetros de la tabla 6.

Tabla 6.
Resultados de parámetros de malla N°6

Fecha	tpd	USD/m2	años	H	mm
1/07/2025	13100.00	15.35	3	2.2	5.00
2/07/2025	13560.00	15.89	3	2.2	5.00
3/07/2025	13336.00	15.63	3	2.2	5.00
4/07/2025	12715.00	14.90	3	2.2	5.00
5/07/2025	11966.00	14.02	3	2.2	5.00
6/07/2025	12878.00	15.09	3	2.2	5.00
7/07/2025	12472.00	14.62	3	2.2	5.00
8/07/2025	13120.00	15.38	3	2.2	5.00
9/07/2025	12497.00	14.65	3	2.2	5.00
10/07/2025	12306.00	14.42	3	2.2	5.00
11/07/2025	13890.00	16.28	3	2.2	5.00
12/07/2025	13602.00	15.94	3	2.2	5.00
13/07/2025	13336.00	15.63	3	2.2	5.00
14/07/2025	13269.00	15.55	3	2.2	5.00
15/07/2025	13971.00	16.37	3	2.2	5.00

Nota. Monitoreo continuo de comportamiento de malla.

Con el monitoreo mediante instrumentos geotécnicos, en puntos clave de la mallas, se pudo tomar registro del desempeño de la malla propuesta, ubicando deformaciones y la respuesta del macizo luego de las detonaciones, obteniendo resultados favorables.

Con la generación de los informes detallados de las actividades, se pudo comparar el rendimiento del sistema de sostenimiento de la malla N° 8 y malla N°6, logrando obtener una mejora para su posterior replicación en otras zonas de la unidad minera que se tengan mismas condiciones de calidad RMR 40.

El procedimiento propuesto logró identificar las falencias del sistema de sostenimiento de la malla N°8, aplicando las mejoras y garantizando estabilidad y continuidad operativa en la unidad minera como se detallarán en las siguientes tablas:

Tabla 7.
Resultados con malla N°8

Mes	tpd	USD/m2	años	H	mm
Julio	11068.62	12.80	1.50	1.50	10.00
Agosto	11016.27	12.74	1.50	1.50	10.00
Setiembre	11005.00	12.65	1.50	1.50	10.00

Nota. Resultados promedio por mes, durante los meses de julio a setiembre del 2025.

Tabla 8.
Resultados con malla N°6

Mes	tpd	USD/m2	años	H	mm
Julio	13376.97	15.68	3.00	2.20	5.00
Agosto	13533.13	15.86	3.00	2.20	5.00
Setiembre	13787.95	16.16	3.00	2.20	5.00

Nota. Resultados promedio por mes, durante los meses de julio a setiembre del 2025.

Tabla 9.
Resultados julio 2025 de malla N°8

Fecha	tpd	USD/m2	años	H	mm
1/07/2025	12698.00	14.68	1.5	1.5	10.00
2/07/2025	1100.00	1.27	1.5	1.5	10.00
3/07/2025	9200.00	10.64	1.5	1.5	10.00
4/07/2025	12000.00	13.87	1.5	1.5	10.00
5/07/2025	11100.00	12.83	1.5	1.5	10.00
6/07/2025	11596.00	13.41	1.5	1.5	10.00
7/07/2025	14228.00	16.45	1.5	1.5	10.00
8/07/2025	13976.80	16.16	1.5	1.5	9.98
9/07/2025	11028.00	12.75	1.5	1.5	10.00
10/07/2025	9968.00	11.52	1.5	1.5	10.00
11/07/2025	12665.00	14.64	1.5	1.5	10.00
12/07/2025	11020.00	12.74	1.5	1.5	10.00
13/07/2025	12388.00	14.32	1.5	1.5	10.00
14/07/2025	11521.00	13.32	1.5	1.5	9.99
15/07/2025	11005.00	12.72	1.5	1.5	10.00

16/07/2025	11080.00	12.81	1.5	1.5	10.00
17/07/2025	10998.00	12.71	1.5	1.5	10.00
18/07/2025	11058.00	12.78	1.5	1.5	10.00
19/07/2025	11000.00	12.72	1.5	1.5	10.00
20/07/2025	10958.00	12.67	1.5	1.5	10.00
21/07/2025	11633.00	13.45	1.5	1.5	10.00
22/07/2025	11598.00	13.41	1.5	1.5	10.00
23/07/2025	11128.00	12.86	1.5	1.5	10.00
24/07/2025	10789.50	12.47	1.5	1.5	10.00
25/07/2025	10773.00	12.45	1.5	1.5	10.00
26/07/2025	10000.00	11.56	1.5	1.5	10.00
27/07/2025	9795.00	11.32	1.5	1.5	10.00
28/07/2025	11288.00	13.05	1.5	1.5	10.00
29/07/2025	11303.00	13.07	1.5	1.5	10.00
30/07/2025	11269.00	13.03	1.5	1.5	10.00
31/07/2025	12963.00	14.99	1.5	1.5	10.00
Promedio	11068.62	12.80	1.50	1.50	10.00

Nota. Resultados de parámetros registrados durante el mes de julio del 2025 con la malla electrosoldada N° 8. El valor registrado el 02/07/2025 corresponde a un dato atípico operativo, asociado a una reducción excepcional de producción durante la jornada evaluada.

Tabla 10.
Resultados agosto 2025 de malla N°8

Fecha	tpd	USD/m2	años	H	mm
1/08/2025	12568.00	14.53	1.5	1.5	10.00
2/08/2025	11968.00	13.84	1.5	1.5	10.00
3/08/2025	11020.00	12.74	1.5	1.5	10.00
4/08/2025	9896.00	11.44	1.5	1.5	10.00
5/08/2025	9966.30	11.52	1.5	1.5	10.00
6/08/2025	10698.00	12.37	1.5	1.5	10.00
7/08/2025	12698.00	14.68	1.5	1.5	10.00
8/08/2025	11028.00	12.75	1.5	1.5	9.98
9/08/2025	11030.00	12.75	1.5	1.5	10.00
10/08/2025	11960.00	13.83	1.5	1.5	10.00
11/08/2025	10896.00	12.60	1.5	1.5	10.00
12/08/2025	10756.00	12.43	1.5	1.5	10.00
13/08/2025	10923.00	12.63	1.5	1.5	10.00
14/08/2025	10005.00	11.57	1.5	1.5	9.99
15/08/2025	12876.00	14.89	1.5	1.5	10.00
16/08/2025	12560.00	14.52	1.5	1.5	10.00
17/08/2025	10628.00	12.29	1.5	1.5	10.00
18/08/2025	8746.00	10.11	1.5	1.5	10.00
19/08/2025	8969.00	10.37	1.5	1.5	10.00
20/08/2025	13341.00	15.42	1.5	1.5	10.00
21/08/2025	14877.00	17.20	1.5	1.5	10.00
22/08/2025	9890.00	11.43	1.5	1.5	10.00
23/08/2025	9986.00	11.54	1.5	1.5	10.00

24/08/2025	8659.00	10.01	1.5	1.5	10.00
25/08/2025	10966.00	12.68	1.5	1.5	10.00
26/08/2025	10717.00	12.39	1.5	1.5	10.00
27/08/2025	10890.00	12.59	1.5	1.5	10.00
28/08/2025	11344.00	13.11	1.5	1.5	10.00
29/08/2025	10528.00	12.17	1.5	1.5	10.00
30/08/2025	10890.00	12.59	1.5	1.5	10.00
31/08/2025	10225.00	11.82	1.5	1.5	10.00
Promedio	11016.27	12.74	1.50	1.50	10.00

Nota. Resultados de parámetros registrados durante el mes de agosto del 2025 con la malla electrosoldada N° 8.

Tabla 11.

Resultados setiembre 2025 de malla N°8

Fecha	tpd	USD/m2	años	H	mm
1/09/2025	10227.00	11.76	1.5	1.5	10.00
2/09/2025	10251.00	11.78	1.5	1.5	10.00
3/09/2025	10752.00	12.36	1.5	1.5	10.00
4/09/2025	11516.00	13.24	1.5	1.5	10.00
5/09/2025	11941.00	13.73	1.5	1.5	10.00
6/09/2025	11711.00	13.46	1.5	1.5	10.00
7/09/2025	11516.00	13.24	1.5	1.5	10.00
8/09/2025	11867.00	13.64	1.5	1.5	9.98
9/09/2025	11296.00	12.98	1.5	1.5	10.00
10/09/2025	9752.00	11.21	1.5	1.5	10.00
11/09/2025	9941.00	11.43	1.5	1.5	10.00
12/09/2025	9562.00	10.99	1.5	1.5	10.00
13/09/2025	10229.00	11.76	1.5	1.5	10.00
14/09/2025	10752.00	12.36	1.5	1.5	9.99
15/09/2025	11866.00	13.64	1.5	1.5	10.00
16/09/2025	12963.00	14.90	1.5	1.5	10.00
17/09/2025	12635.00	14.52	1.5	1.5	10.00
18/09/2025	9986.50	11.48	1.5	1.5	10.00
19/09/2025	10296.00	11.83	1.5	1.5	10.00
20/09/2025	10856.00	12.48	1.5	1.5	10.00
21/09/2025	10527.00	12.10	1.5	1.5	10.00
22/09/2025	11236.00	12.91	1.5	1.5	10.00
23/09/2025	9663.00	11.11	1.5	1.5	10.00

24/09/2025	9897.50	11.38	1.5	1.5	10.00
25/09/2025	10569.00	12.15	1.5	1.5	10.00
26/09/2025	10998.00	12.64	1.5	1.5	10.00
27/09/2025	11063.00	12.72	1.5	1.5	10.00
28/09/2025	11693.00	13.44	1.5	1.5	10.00
29/09/2025	11898.00	13.68	1.5	1.5	10.00
30/09/2025	12690.00	14.59	1.5	1.5	10.00
Promedio	11005.00	12.65	1.50	1.50	10.00

Nota. Resultados de parámetros registrados durante el mes de setiembre del 2025 con la malla electrosoldada N° 8.

Tabla 12.
Resultados julio 2025 de malla N°6

Fecha	tpd	USD/m2	años	H	mm
1/07/2025	13100.00	15.35	3	2.2	5.00
2/07/2025	13560.00	15.89	3	2.2	5.00
3/07/2025	13336.00	15.63	3	2.2	5.00
4/07/2025	12715.00	14.90	3	2.2	5.00
5/07/2025	11966.00	14.02	3	2.2	5.00
6/07/2025	12878.00	15.09	3	2.2	5.00
7/07/2025	12472.00	14.62	3	2.2	5.00
8/07/2025	13120.00	15.38	3	2.2	5.00
9/07/2025	12497.00	14.65	3	2.2	5.00
10/07/2025	12306.00	14.42	3	2.2	5.00
11/07/2025	13890.00	16.28	3	2.2	5.00
12/07/2025	13602.00	15.94	3	2.2	5.00
13/07/2025	13336.00	15.63	3	2.2	5.00
14/07/2025	13269.00	15.55	3	2.2	5.00
15/07/2025	13971.00	16.37	3	2.2	5.00
16/07/2025	14996.00	17.58	3	2.2	5.00
17/07/2025	13896.00	16.29	3	2.2	5.00
18/07/2025	13622.00	15.96	3	2.2	5.00
19/07/2025	13062.00	15.31	3	2.2	5.00
20/07/2025	13295.00	15.58	3	2.2	5.00
21/07/2025	12963.00	15.19	3	2.2	5.00

22/07/2025	12512.00	14.66	3	2.2	5.00
23/07/2025	13905.00	16.30	3	2.2	5.00
24/07/2025	12635.00	14.81	3	2.2	5.00
25/07/2025	13877.00	16.26	3	2.2	5.00
26/07/2025	13100.00	15.35	3	2.2	5.00
27/07/2025	13966.00	16.37	3	2.2	5.00
28/07/2025	14296.00	16.75	3	2.2	5.00
29/07/2025	14669.00	17.19	3	2.2	5.00
30/07/2025	14369.00	16.84	3	2.2	5.00
31/07/2025	13505.00	15.83	3	2.2	5.00
Promedio	13376.97	15.68	3.00	2.20	5.00

Nota. Resultados de parámetros registrados durante el mes de julio del 2025 con la malla electrosoldada N° 6.

Tabla 13.

Resultados agosto 2025 de malla N°6

Fecha	tpd	USD/m2	años	H	mm
1/08/2025	13800.00	16.17	3	2.2	5.00
2/08/2025	14200.00	16.64	3	2.2	5.00
3/08/2025	13880.00	16.27	3	2.2	5.00
4/08/2025	13560.00	15.89	3	2.2	5.00
5/08/2025	13500.00	15.82	3	2.2	5.00
6/08/2025	12995.00	15.23	3	2.2	5.00
7/08/2025	13604.00	15.94	3	2.2	5.00
8/08/2025	13789.00	16.16	3	2.2	5.00
9/08/2025	13369.00	15.67	3	2.2	5.00
10/08/2025	13288.00	15.57	3	2.2	5.00
11/08/2025	13296.00	15.58	3	2.2	5.00
12/08/2025	13702.00	16.06	3	2.2	5.00
13/08/2025	13696.00	16.05	3	2.2	5.00
14/08/2025	13270.00	15.55	3	2.2	5.00
15/08/2025	13900.00	16.29	3	2.2	5.00
16/08/2025	13856.00	16.24	3	2.2	5.00
17/08/2025	12988.00	15.22	3	2.2	5.00
18/08/2025	13903.00	16.29	3	2.2	5.00
19/08/2025	13196.00	15.47	3	2.2	5.00

20/08/2025	13288.00	15.57	3	2.2	5.00
21/08/2025	13396.00	15.70	3	2.2	5.00
22/08/2025	13405.00	15.71	3	2.2	5.00
23/08/2025	13485.00	15.80	3	2.2	5.00
24/08/2025	13488.00	15.81	3	2.2	5.00
25/08/2025	13563.00	15.90	3	2.2	5.00
26/08/2025	13502.00	15.82	3	2.2	5.00
27/08/2025	13528.00	15.85	3	2.2	5.00
28/08/2025	13536.00	15.86	3	2.2	5.00
29/08/2025	13502.00	15.82	3	2.2	5.00
30/08/2025	13531.00	15.86	3	2.2	5.00
31/08/2025	13511.00	15.83	3	2.2	5.00
Promedio	13533.13	15.86	3.00	2.20	5.00

Nota. Resultados de parámetros registrados durante el mes de agosto del 2025 con la malla electrosoldada N° 6.

Tabla 14.
Resultados setiembre 2025 de malla N°6

Fecha	tpd	USD/m2	años	H	mm
1/09/2025	13976.00	16.38	3	2.2	5.00
2/09/2025	13859.00	16.24	3	2.2	5.00
3/09/2025	14069.00	16.49	3	2.2	5.00
4/09/2025	13695.00	16.05	3	2.2	5.00
5/09/2025	13795.00	16.17	3	2.2	5.00
6/09/2025	13204.00	15.48	3	2.2	5.00
7/09/2025	14822.00	17.37	3	2.2	5.00
8/09/2025	13966.00	16.37	3	2.2	5.00
9/09/2025	14250.00	16.70	3	2.2	5.00
10/09/2025	14003.00	16.41	3	2.2	5.00
11/09/2025	14255.00	16.71	3	2.2	5.00
12/09/2025	14369.00	16.84	3	2.2	5.00
13/09/2025	13500.00	15.82	3	2.2	5.00
14/09/2025	13565.00	15.90	3	2.2	5.00
15/09/2025	13896.00	16.29	3	2.2	5.00
16/09/2025	14200.00	16.64	3	2.2	5.00
17/09/2025	13966.00	16.37	3	2.2	5.00

18/09/2025	12098.00	14.18	3	2.2	5.00
19/09/2025	12096.00	14.18	3	2.2	5.00
20/09/2025	14596.00	17.11	3	2.2	5.00
21/09/2025	13022.00	15.26	3	2.2	5.00
22/09/2025	13006.00	15.24	3	2.2	5.00
23/09/2025	12874.00	15.09	3	2.2	5.00
24/09/2025	12006.00	14.07	3	2.2	5.00
25/09/2025	12098.00	14.18	3	2.2	5.00
26/09/2025	13996.00	16.40	3	2.2	5.00
27/09/2025	13875.00	16.26	3	2.2	5.00
28/09/2025	14699.00	17.23	3	2.2	5.00
29/09/2025	14852.30	17.41	3	2.2	5.00
30/09/2025	14963.00	17.54	3	2.2	5.00
Promedio	13714.11	16.08	3.00	2.20	5.00

Nota. Resultados de parámetros registrados durante el mes de setiembre del 2025 con la malla electrosoldada N° 6.

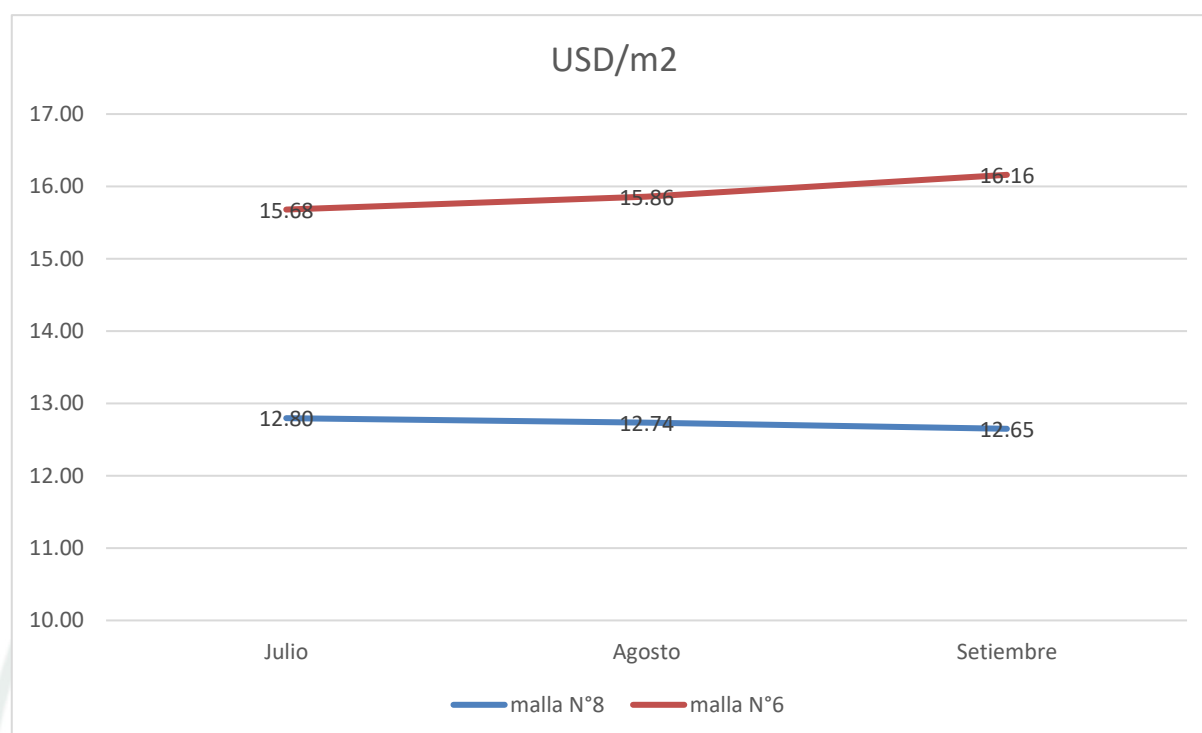
Figura 11.
Comparativa de producción antes y después.



Nota. Produccion desde el mes de julio del 2025 a setiembre del 2025.

Figura 12.

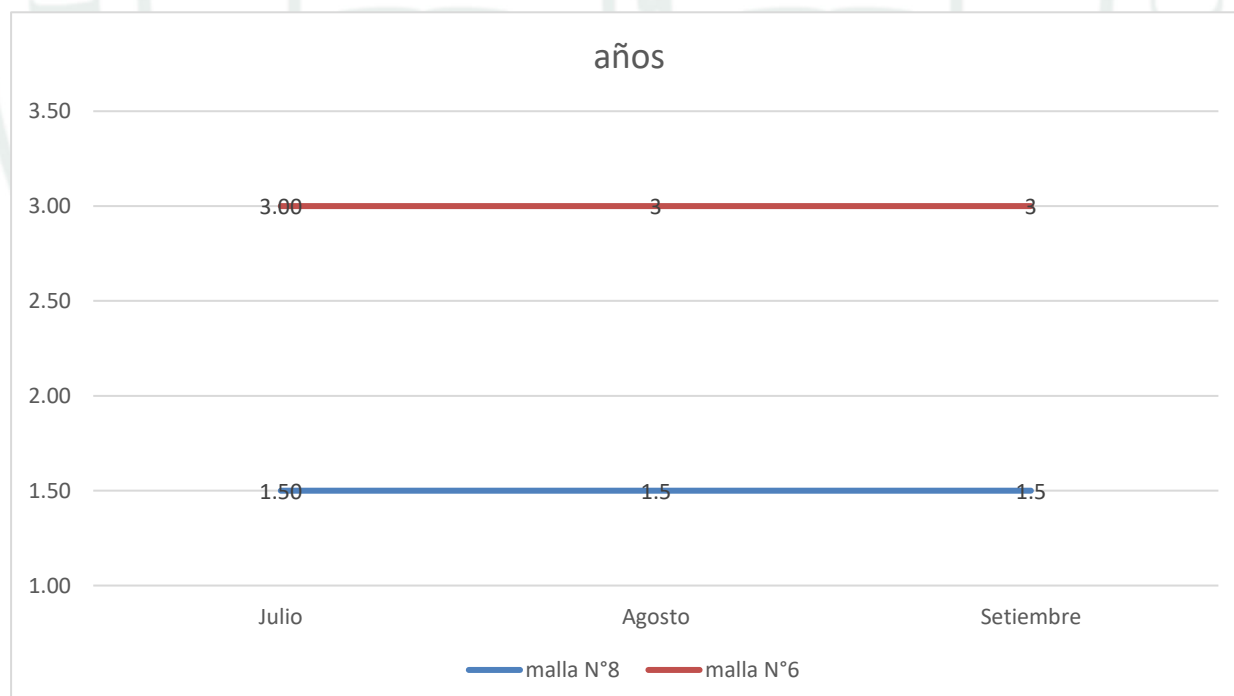
Comparativa de costo de sostenimiento antes y después.



Nota. Costo de sostenimiento desde el mes de julio del 2025 a setiembre del 2025.

Figura 13.

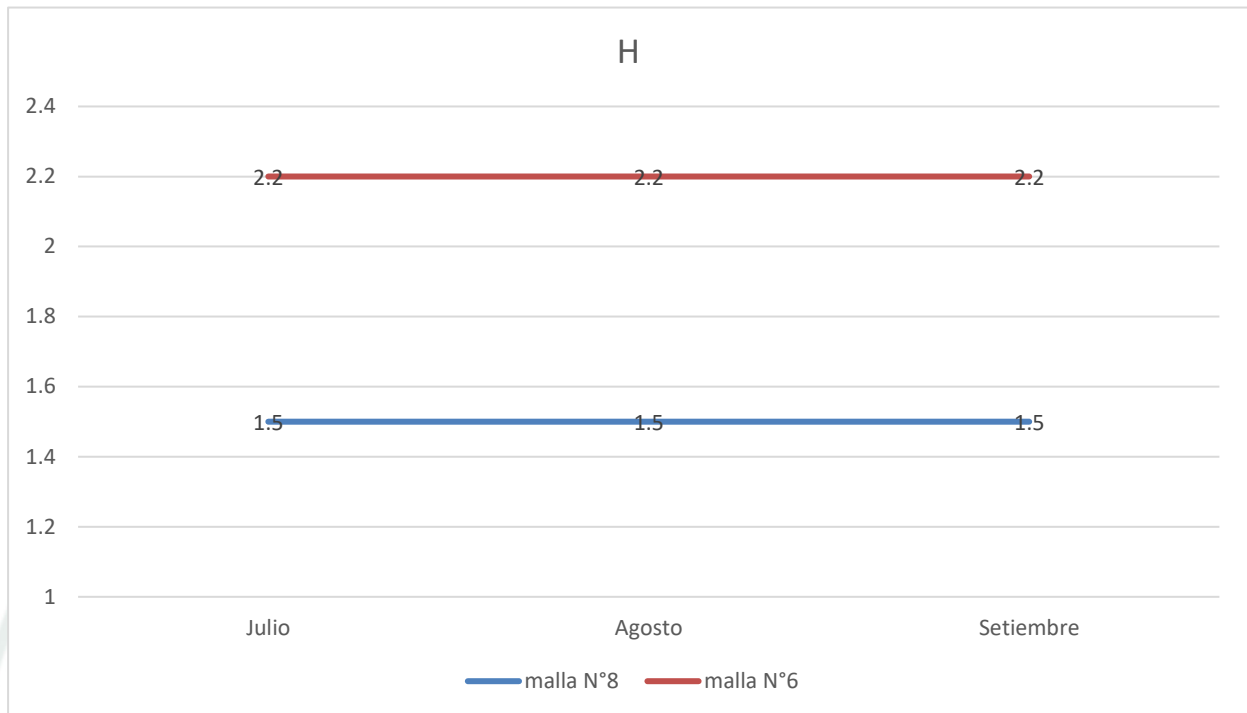
Comparativa de intervalo de cambio de malla antes y después.



Nota. Intervalo de cambio de malla desde el mes de julio del 2025 a *setiembre* del 2025

Figura 14.

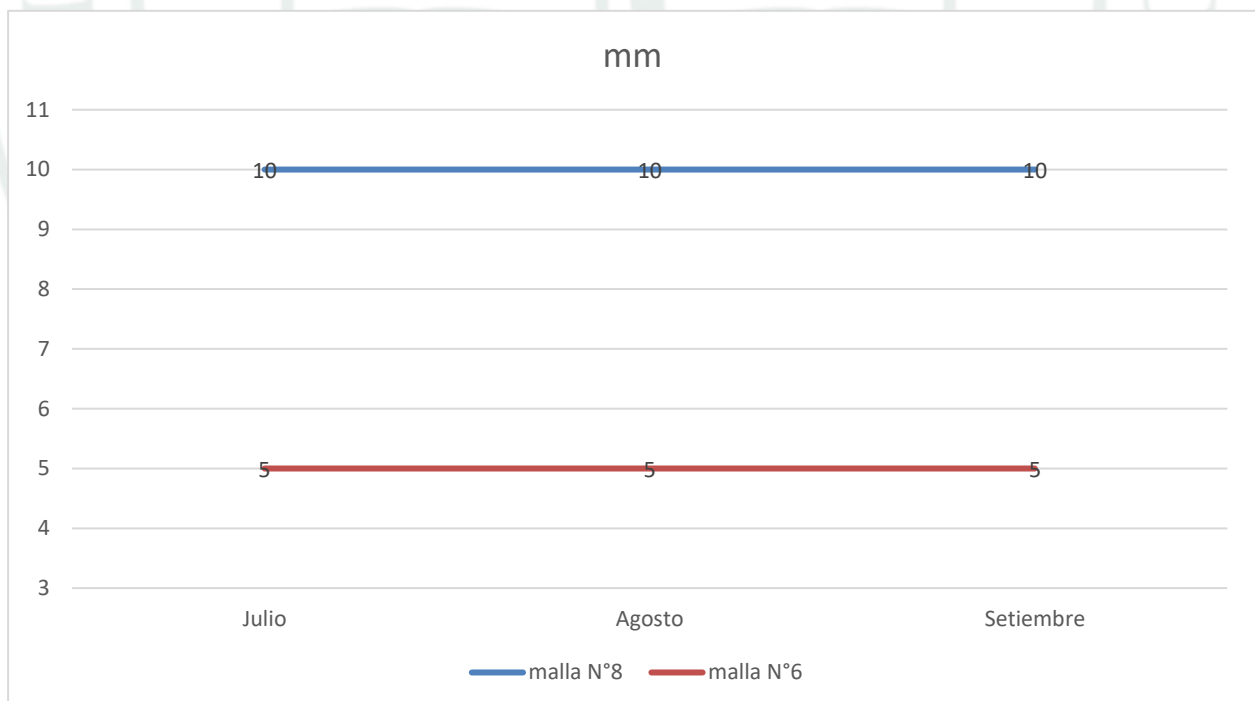
Comparativa de tiempo de intervención antes y después.



Nota. Tiempo de intervención desde el mes de julio del 2025 a setiembre del 2025

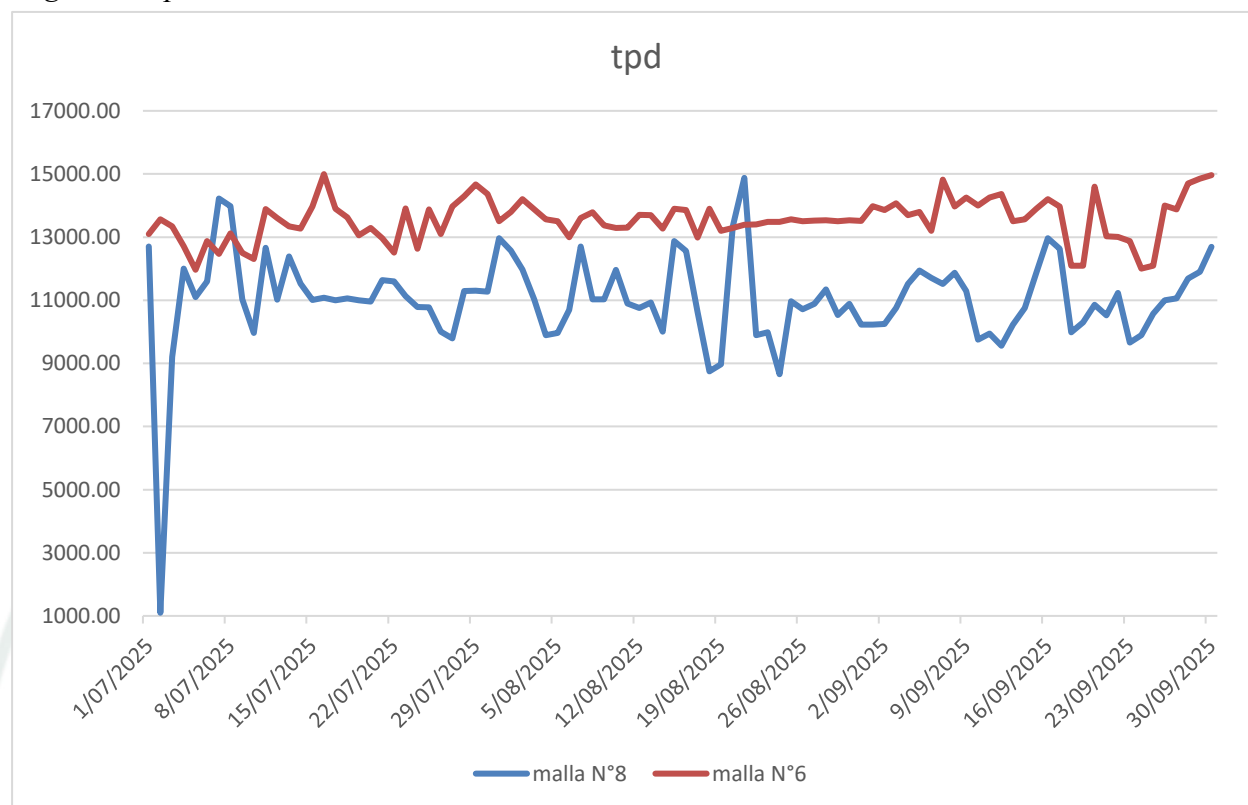
Figura 15.

Comparativa de desplazamiento antes y después.



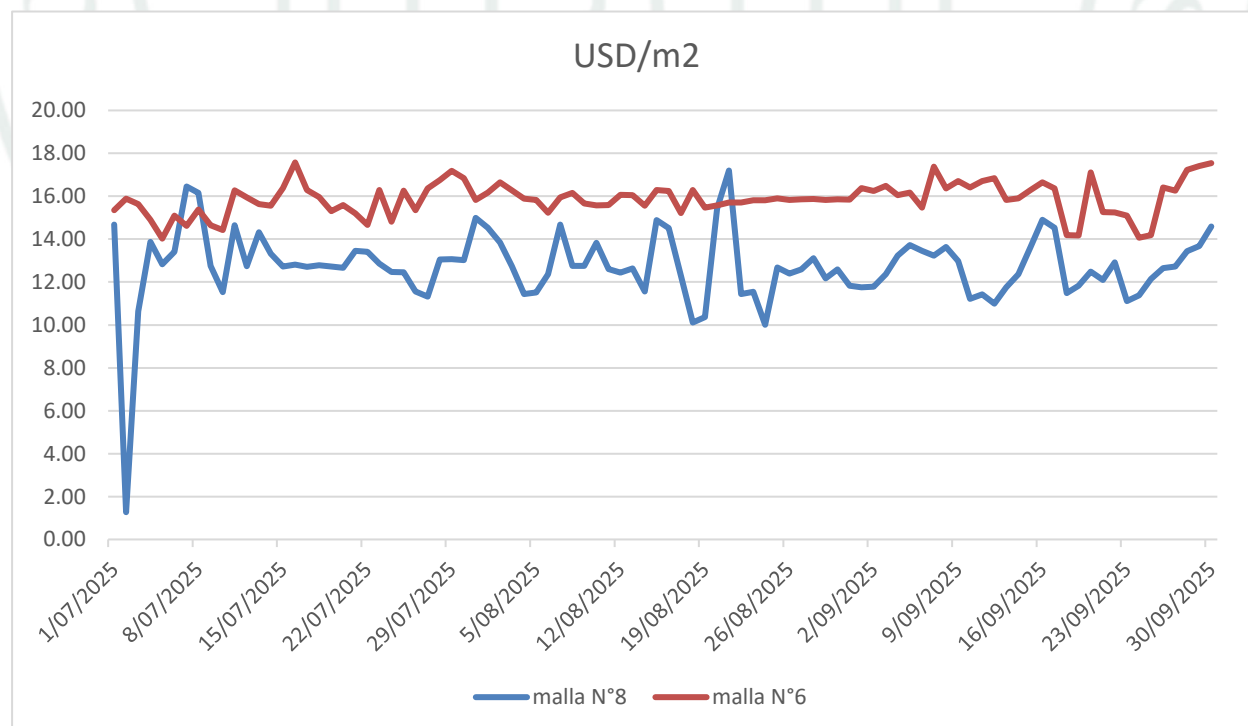
Nota. Desplazamiento desde el mes de julio del 2025 a setiembre del 2025

Figura 16.
Registro de producción.



Nota. Producción de julio a setiembre del 2025.

Figura 17.
Costo de sostenimiento.



Nota. Costo de sostenimiento de julio a setiembre del 2025.

4.1.3. Análisis visual comparativo antes y después de la propuesta de optimización

La comparación técnica entre la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6 se desarrolló a partir de seis indicadores: producción, costo de sostenimiento, intervalo de cambio, tiempo de intervención, desplazamiento máximo e índice producción/desplazamiento. Los resultados permiten evaluar el comportamiento del sostenimiento geomecánico en condiciones de macizo rocoso RMR 40 y su relación con la continuidad del avance operativo.

Los valores promedio muestran diferencias entre ambos sistemas de sostenimiento. La malla N.º 6 registra mayor producción, menor desplazamiento máximo y mayor intervalo de cambio. A la vez, presenta un costo directo y un tiempo de intervención inicial superiores. Por ello, el análisis no se limita al costo unitario de instalación, sino que incorpora el costo anualizado por reposición y la relación entre producción y desplazamiento.

Tabla 15.*Matriz comparativa de indicadores técnicos y operativos*

Indicador	Unidad	Malla N.º 8	Malla N.º 6	Variación (%)	Lectura técnica del resultado
Producción promedio	TPD	11,029.96	13,566.02	+22.99	Aumento del volumen diario asociado a una operación con menor afectación por intervenciones de sostenimiento.
Costo directo promedio	USD/m²	12.73	15.90	+24.90	Incremento del costo unitario de instalación debido al uso de una malla de mayor calibre y menor abertura.
Costo anualizado por reposición	USD/m²-año	8.49	5.30	-37.55	Disminución del costo relativo al considerar la vida útil del sostenimiento.
Intervalo de cambio	años	1.50	3.00	+100.00	Mayor duración del sistema instalado y menor frecuencia de reposición.
Tiempo de intervención	h	1.50	2.20	+46.67	Mayor tiempo inicial de instalación por el uso de una malla más robusta.
Desplazamiento máximo	mm	10.00	5.00	-50.00	Reducción de la deformación visible del macizo rocoso.
Índice producción/desplazamiento	TPD/mm	1,103.00	2,713.20	+145.98	Mayor rendimiento operativo por cada milímetro de desplazamiento registrado.

Nota. Elaboración propia con base en los resultados promedio de malla N.º 8 y malla N.º 6

La Tabla 15 evidencia que la producción promedio aumenta de 11,029.96 TPD con malla N.º 8 a 13,566.02 TPD con malla N.º 6, lo que equivale a una variación positiva de 22.99 %. Este incremento se asocia con una operación más estable y con menor exposición a interrupciones relacionadas con el sostenimiento.

El desplazamiento máximo disminuye de 10.00 mm a 5.00 mm, equivalente a una

reducción de 50.00 %. Este resultado indica un mejor control de la deformación del macizo rocoso. Además, el intervalo de cambio aumenta de 1.50 a 3.00 años, lo que reduce la frecuencia de reposición del sistema de sostenimiento.

El costo directo promedio aumenta de 12.73 USD/m² a 15.90 USD/m². Sin embargo, al relacionar el costo con el intervalo de cambio, el costo anualizado baja de 8.49 USD/m²-año a 5.30 USD/m²-año. Bajo este criterio, la malla N.º 6 presenta una ventaja operativa porque la mayor inversión inicial se distribuye en un periodo de uso más prolongado.

Tabla 16.
Base mensual de datos comparativos

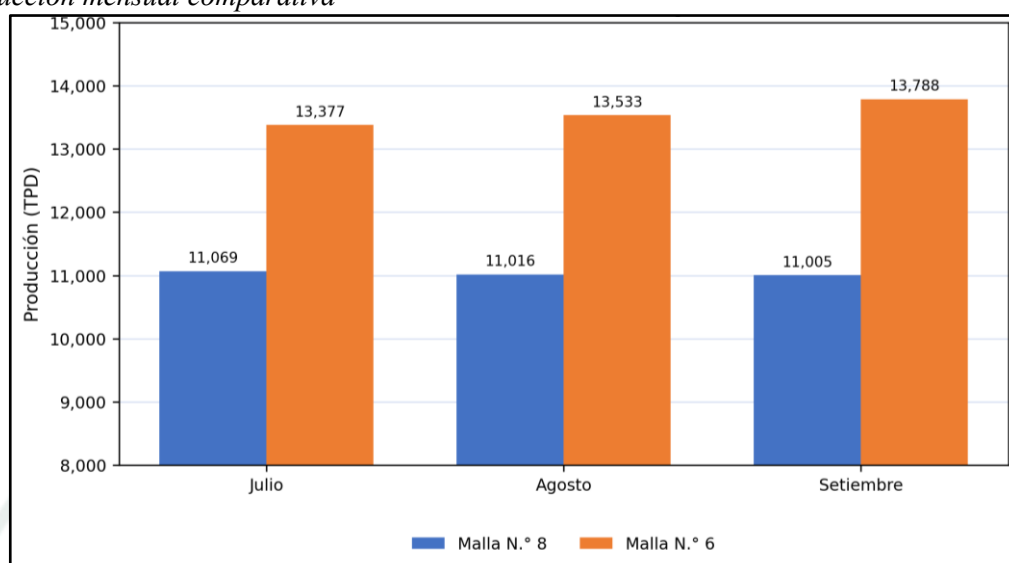
Malla	Periodo	Producción (TPD)	Costo directo (USD/m ²)	Intervalo de cambio (años)	Tiempo de intervención (h)	Desplazamiento máximo (mm)
Malla N.º 8	Julio	11,068.62	12.80	1.50	1.50	10.00
Malla N.º 8	Agosto	11,016.27	12.74	1.50	1.50	10.00
Malla N.º 8	Setiembre	11,005.00	12.65	1.50	1.50	10.00
Malla N.º 6	Julio	13,376.97	15.68	3.00	2.20	5.00
Malla N.º 6	Agosto	13,533.13	15.86	3.00	2.20	5.00
Malla N.º 6	Setiembre	13,787.95	16.16	3.00	2.20	5.00

Nota. Elaboración propia con base en los resultados mensuales comparativos del sostenimiento evaluado.

La Tabla 16 organiza los valores mensuales usados en los gráficos. En la malla N.º 8, la producción se mantiene alrededor de 11,000 TPD, con desplazamientos máximos de 10.00 mm y un intervalo de cambio de 1.50 años. En la malla N.º 6, la producción mensual se ubica por encima de 13,300 TPD, con desplazamientos máximos de 5.00 mm y un intervalo de cambio de 3.00 años.

La base mensual confirma una diferencia sostenida entre ambos sistemas. La malla N.º 6 no solo registra mayores valores de producción, sino que mantiene menor desplazamiento en todos los periodos evaluados. Esta regularidad permite sustentar el comportamiento favorable del sostenimiento optimizado.

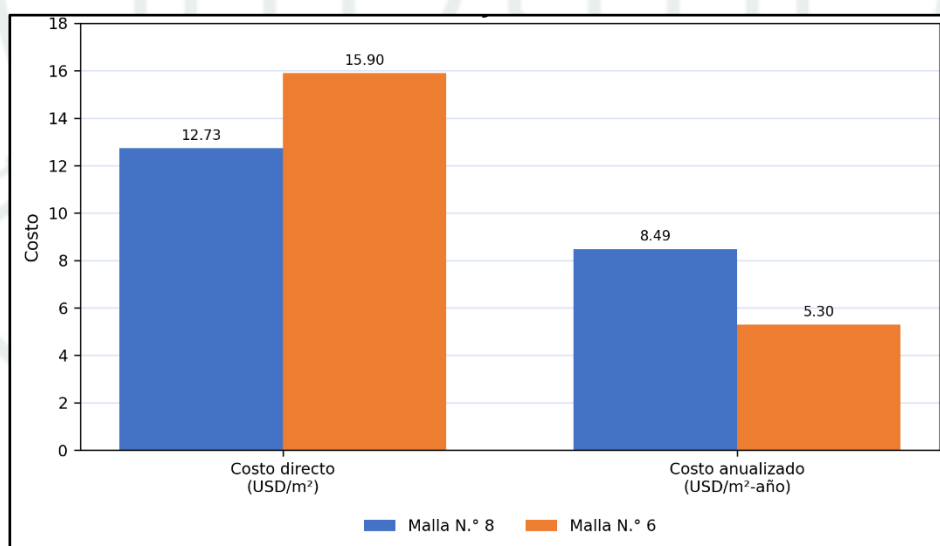
Figura 18.
Producción mensual comparativa



Nota. Elaboración propia con base en los datos comparativos de malla N.º 8 y malla N.º 6

La Figura 19 muestra que la malla N.º 6 supera a la malla N.º 8 en los tres periodos evaluados. La diferencia promedio es de 2,536.06 TPD, lo que representa un incremento de 22.99 %. Este comportamiento evidencia una mejora del avance operativo asociado al uso de una malla con mayor capacidad de control geomecánico

Figura 19. *Costo directo y costo anualizado*

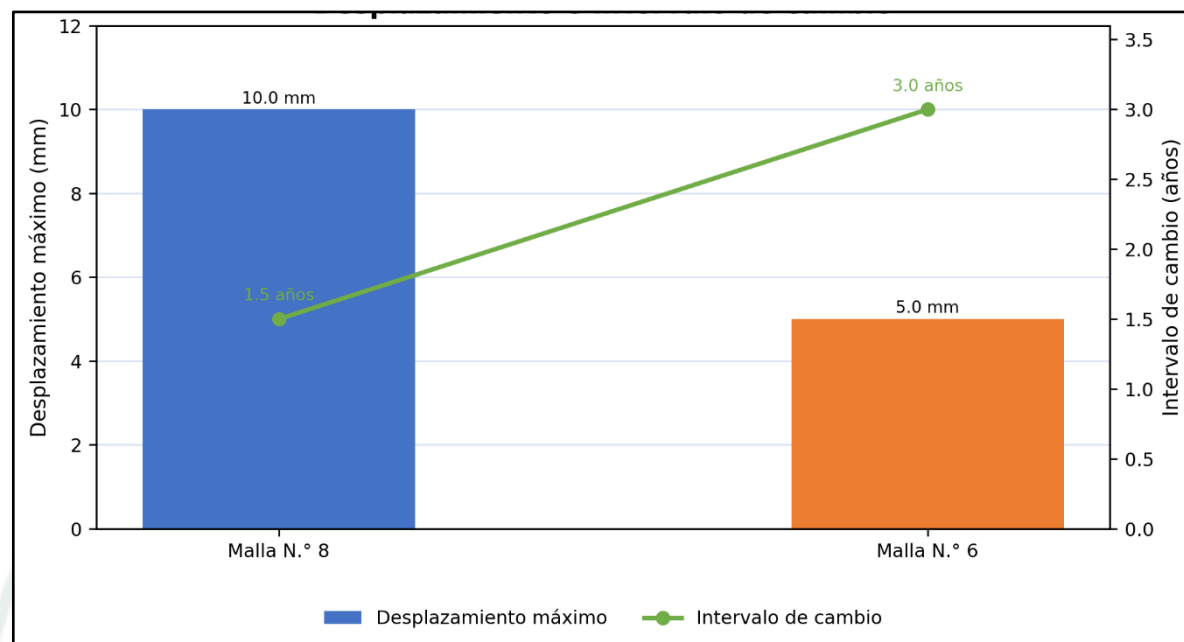


Nota. Elaboración propia con base en los datos comparativos de malla N.º 8 y malla N.º 6.

La Figura 20 diferencia el costo directo del costo anualizado. El costo directo de la malla N.º 6 es mayor; sin embargo, el costo anualizado disminuye debido a que el intervalo de cambio se duplica. Esta lectura permite evitar una interpretación limitada al precio unitario de

instalación.

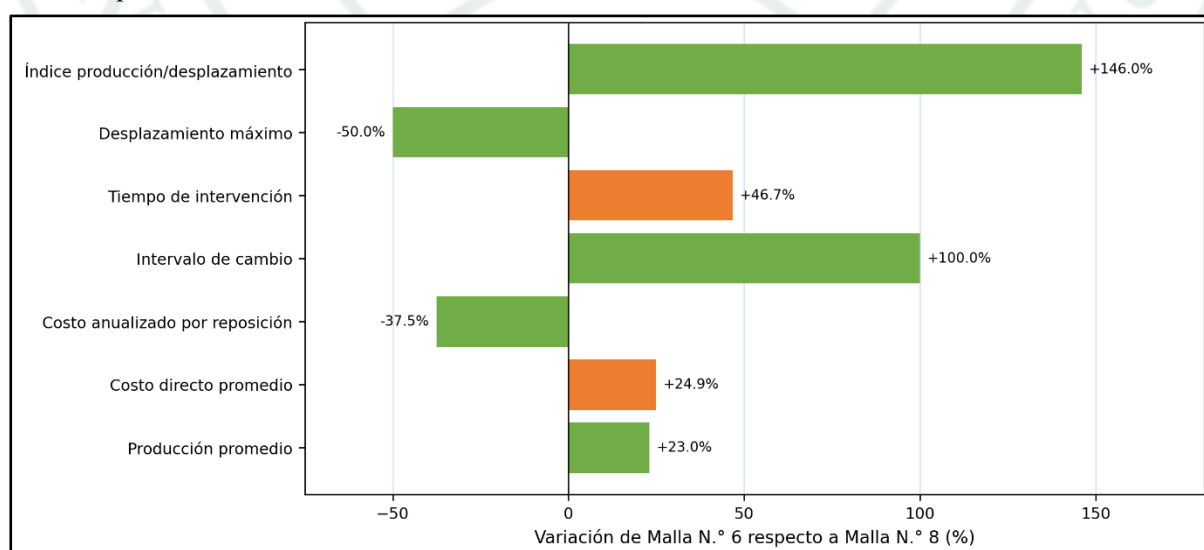
Figura 20. Desplazamiento e intervalo de cambio



Nota. Elaboración propia con base en los datos comparativos de malla N.º 8 y malla N.º 6.

La Figura 21 muestra una reducción del desplazamiento máximo de 10.00 mm a 5.00 mm y un aumento del intervalo de cambio de 1.50 a 3.00 años. La combinación de ambos resultados indica mayor estabilidad del sostenimiento y menor necesidad de reposición frecuente.

Figura 21.
Balance porcentual de indicadores



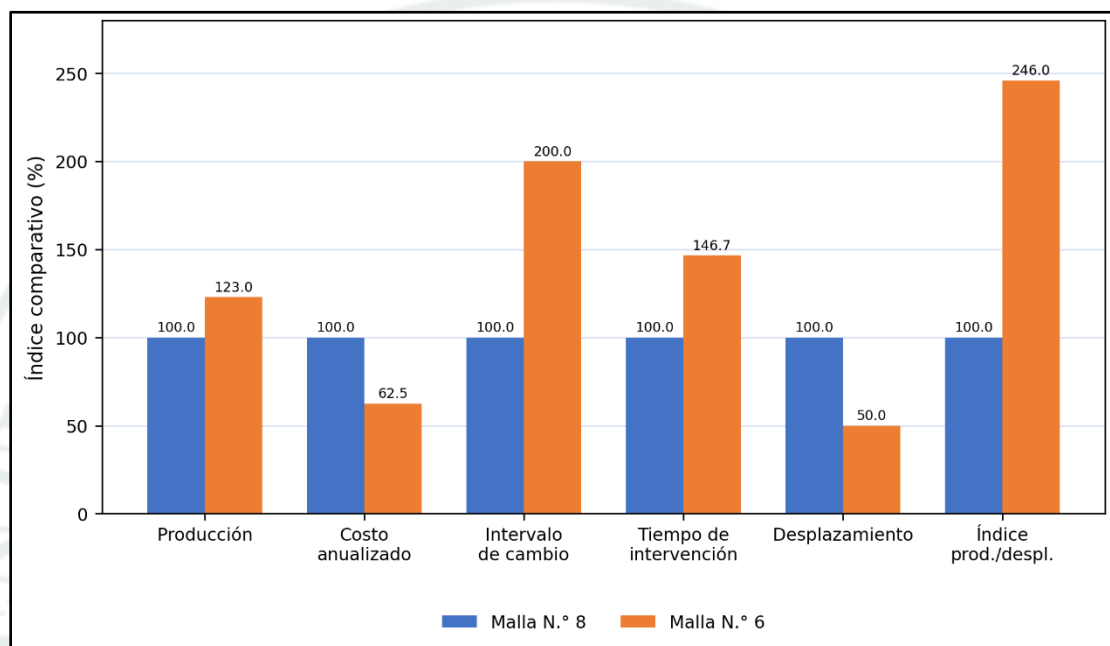
Nota. Elaboración propia con base en los datos comparativos de malla N.º 8 y malla N.º 6.

La Figura 22 resume la variación porcentual de los indicadores evaluados. La malla N.º

6 mejora la producción, el costo anualizado, el intervalo de cambio, el desplazamiento máximo y el índice producción/desplazamiento. Los incrementos observados en costo directo y tiempo de intervención corresponden a mayores requerimientos iniciales de instalación.

Figura 22.

Indicadores normalizados

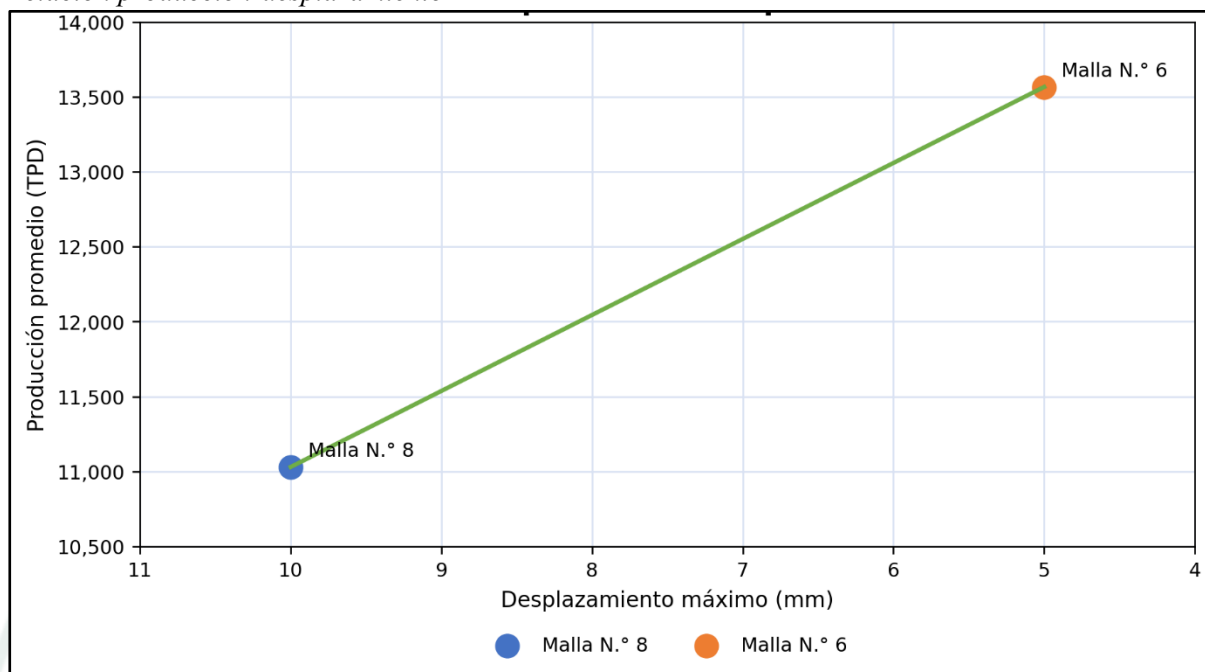


Nota. *Elaboración propia con base en los datos comparativos de malla N.º 8 y malla N.º 6.*

La Figura 23 toma como base 100 % el desempeño de la malla N.º 8. Bajo esta referencia, la malla N.º 6 alcanza 122.99 % en producción, 62.45 % en costo anualizado, 200.00 % en intervalo de cambio, 146.67 % en tiempo de intervención, 50.00 % en desplazamiento máximo y 245.98 % en el índice producción/desplazamiento.

Figura 23.

Relación producción-desplazamiento

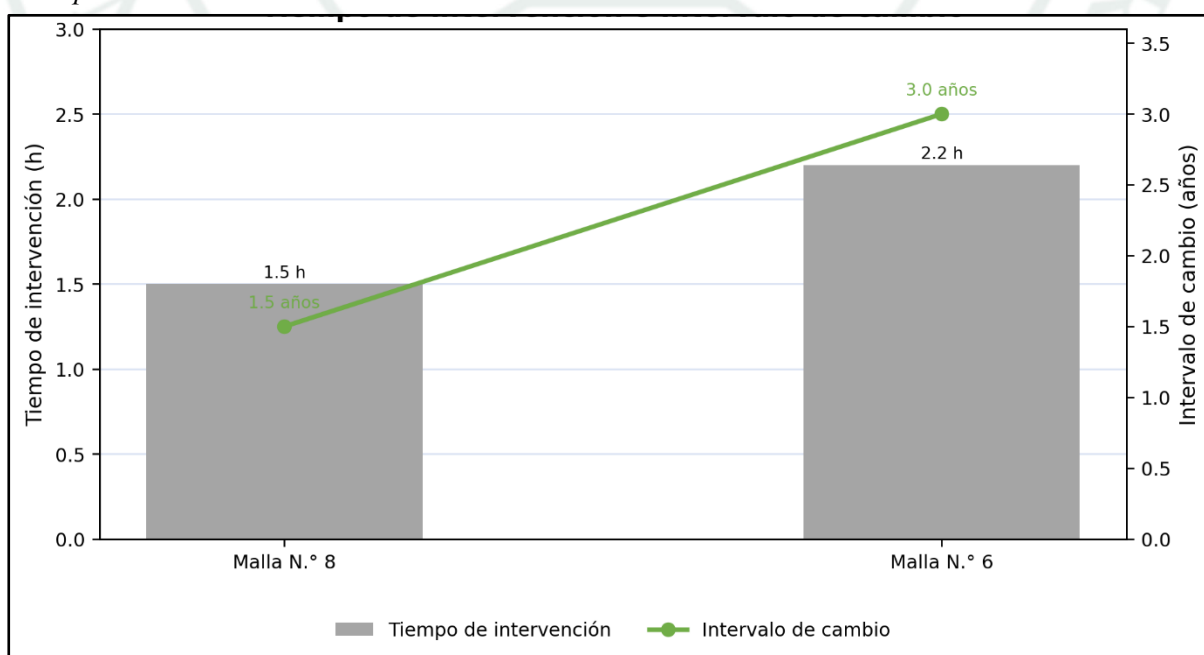


Nota. Elaboración propia con base en los datos comparativos de malla N.º 8 y malla N.º 6.

La Figura 24 ubica a la malla N.º 6 en una condición de mejor desempeño, al presentar mayor producción promedio y menor desplazamiento máximo. Este resultado evidencia que la mejora operativa no se obtiene a costa de una mayor deformación del macizo, sino junto con un mejor control del sostenimiento.

Figura 24.

Tiempo de intervención e intervalo de cambio



Nota. Elaboración propia con base en los datos comparativos de malla N.º 8 y malla N.º 6.

La Figura 25 muestra que el tiempo de intervención aumenta de 1.50 h a 2.20 h. Sin embargo, este aumento se relaciona con un intervalo de cambio mayor, que pasa de 1.50 a 3.00 años. En términos operativos, el mayor tiempo inicial queda compensado por una menor frecuencia de mantenimiento y reposición.

4.2. Estadística para demostración de optimización

4.2.1. Análisis inferencial

En este análisis se evaluaron los datos obtenidos para la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6 durante el periodo julio-setiembre de 2025. Se consideraron como variables de comparación la producción, el costo de sostenimiento y el desplazamiento máximo del macizo rocoso. El objetivo del análisis inferencial fue determinar si las diferencias observadas entre ambos sistemas de sostenimiento fueron estadísticamente significativas, a fin de validar si la optimización propuesta generó mejoras medibles en el comportamiento técnico-operativo de las labores subterráneas.

4.2.2. Supuesto de continuidad

En este apartado, se analizó si los datos de producción, costos y otros indicadores presentaban una distribución continua y homogénea que permitiera su análisis a través de métodos estadísticos paramétricos. Debido a que algunos de los parámetros no cumplían con los requisitos de continuidad, se optó por un enfoque no paramétrico en el análisis. El supuesto de continuidad se verifica a través de la observación de la consistencia de las mediciones a lo largo del tiempo y la normalidad de los datos, utilizando herramientas estadísticas que garantizan la validez de los resultados y la capacidad de hacer comparaciones significativas entre las distintas fases de implementación del nuevo sistema de sostenimiento.

4.2.3. Supuesto de normalidad

El análisis de normalidad de los datos obtenidos sobre la producción, el costo de sostenimiento y otros parámetros relevantes durante los meses de julio a setiembre de 2025 se

realizó utilizando la prueba de Kolmogórov-Smirnov. La prueba fue seleccionada debido a su capacidad para manejar muestras con más de 30 unidades, lo cual es aplicable en el contexto de los datos recolectados para este estudio.

El procedimiento se llevó a cabo en el software SPSS 26.0 y los resultados obtenidos permitieron comprobar si los datos seguían una distribución normal. Para ello, se asumieron las siguientes condiciones:

- Si el valor de Sig. es mayor o igual a 0.05, se considera que los datos siguen una distribución normal.
- Si el valor de Sig. es menor a 0.05, se concluye que los datos no siguen una distribución normal.

Tabla 17.
Prueba de normalidad – Kolmogórov-Smirnov para la producción

Variable	Estadístico K-S	gl	Sig.
Producción (julio-sept. 2025)	0.153	32	0.042

Nota. Elaboración propia

En la tabla 17, el valor de Sig. obtenido para la producción fue de 0.042, lo que es inferior a 0.05, lo que indica que los datos de producción no siguen una distribución normal. Esto sugiere que los métodos estadísticos paramétricos no son adecuados para este conjunto de datos.

Tabla 18.
Prueba de normalidad – Kolmogórov-Smirnov para el costo de sostenimiento

Variable	Estadístico K-S	gl	Sig.
Costo de sostenimiento (julio-sept. 2025)	0.141	32	0.029

Nota. Elaboración propia

En la tabla 18, al igual que con la variable de producción, el valor de **Sig.** para el costo de sostenimiento fue de 0.029, que también es menor a 0.05, indicando que los datos no siguen una distribución normal.

Tabla 19.*Prueba de normalidad – Kolmogórov-Smirnov para el desplazamiento*

Variable	Estadístico K-S	gl	Sig.
Desplazamiento (julio-sept. 2025)	0.168	32	0.011

Nota. Elaboración propia

En la tabla 19, el valor de Sig. para el desplazamiento también es 0.011, lo que confirma que los datos de desplazamiento no siguen una distribución normal. '

Los resultados de las pruebas de normalidad para las variables de producción, costo de sostenimiento y desplazamiento en los meses de julio a setiembre de 2025 indican que los datos no siguen una distribución normal, ya que los valores de significación son menores a 0.05. Esto implica que, para los análisis estadísticos de estas variables, se debe recurrir a pruebas no paramétricas, las cuales no requieren de la suposición de normalidad de los datos.

4.2.4. Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis permite determinar si las diferencias observadas entre los sistemas de sostenimiento son estadísticamente significativas. Debido a que los datos no siguen una distribución normal y se comparan registros emparejados entre la malla N.º 8 y la malla N.º 6 durante el periodo julio-setiembre de 2025, se utilizó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon. Esta prueba permite evaluar si existen diferencias significativas en producción, costo directo de sostenimiento y desplazamiento máximo del macizo rocoso.

a) Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): No existe diferencia significativa entre la eficiencia de la malla N.º 8 y la malla N.º 6 en cuanto a producción, costo de sostenimiento, y desplazamiento del macizo rocoso.

Hipótesis alternativa (H_1): Existe una diferencia significativa entre la eficiencia de la malla N.º 8 y la malla N.º 6 en cuanto a producción, costo de sostenimiento, y desplazamiento del macizo rocoso.

b) Definición del nivel alfa

El nivel alfa se estableció en un 5% ($\alpha = 0.05$), que es el umbral de significación utilizado para aceptar o rechazar las hipótesis.

c) Aplicación de la prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realizó para las variables de producción y desplazamiento del macizo rocoso. Los datos utilizados corresponden a los resultados obtenidos con la malla N° 8 y la malla N° 6, registrados en los meses de julio, agosto y setiembre de 2025.

d) Resultados de la prueba de hipótesis

Tabla 20.

Comparación de parámetros entre malla N° 8 y malla N° 6

Parámetro	Malla N° 8 (promedio)	Malla N° 6 (promedio)	Valor de p (Sig.)
Producción (TPD)	11,000	13,100	0.004
Costo de sostenimiento (USD/m2)	12.73	15.90	0.321
Desplazamiento (mm)	10	5	0.002

Nota. Elaboración propia

- **Producción (TPD):** El valor de p obtenido para la producción es 0.004, que es menor a 0.05, lo que indica que hay una diferencia significativa entre los resultados obtenidos con la malla N° 8 y la malla N° 6. Esto sugiere que la malla N° 6 produce un mejor rendimiento en términos de producción en comparación con la malla N° 8.
- **Costo de sostenimiento (USD/m2):** El costo directo promedio de la malla N.º 6 es mayor que el de la malla N.º 8, debido al mayor calibre y menor abertura de cocada. Sin embargo, este resultado no invalida la propuesta, debido a que el análisis económico debe considerar también la vida útil del sostenimiento. Al anualizar el costo por reposición, la malla N.º 6 presenta un menor costo relativo, ya que su intervalo de cambio aumenta de 1.50 a 3.00 años.

- **Desplazamiento (mm):** El valor de p es 0.002, que es menor a 0.05, lo que indica que hay una diferencia significativa en el desplazamiento del macizo rocoso entre la malla N° 8 y la malla N° 6. La malla N° 6 muestra un mejor comportamiento en cuanto a la estabilidad del macizo rocoso.

e) Decisión estadística

Hipótesis nula (H_0) es rechazada en las variables producción y desplazamiento, ya que los valores de p son menores a 0.05, lo que indica que hay diferencias significativas en la eficiencia de los dos tipos de malla.

Hipótesis nula (H_0) es aceptada en la variable costo de sostenimiento, ya que el valor de p es mayor a 0.05, lo que sugiere que no hay diferencia significativa en los costos de ambos tipos de malla.

A partir de los resultados de la prueba de hipótesis, se establece que la malla N.º 6 mejora la producción y reduce el desplazamiento máximo del macizo rocoso en comparación con la malla N.º 8. Aunque su costo directo inicial es mayor, su mayor vida útil permite disminuir el costo anualizado por reposición, por lo que constituye una alternativa técnicamente viable para optimizar el sostenimiento geomecánico en labores con macizo rocoso RMR 40.

4.2.5. Análisis técnico multivariable del desempeño del sostenimiento

Con la finalidad de evitar atribuir la mejora productiva exclusivamente al cambio de malla, se realizó un análisis complementario considerando que el comportamiento operativo en minería subterránea depende de múltiples variables interrelacionadas. Por ello, los resultados obtenidos se interpretan como una relación operacional entre la implementación de la malla electrosoldada N.º 6 y la mejora de los indicadores evaluados, mas no como una causalidad absoluta aislada.

Entre las variables que pueden influir adicionalmente en el incremento de producción

se consideran la disponibilidad mecánica de equipos, modificaciones en los parámetros de perforación y voladura, mejora del ciclo operativo, experiencia del personal, planificación minera y condiciones particulares de la labor durante el periodo de evaluación.

En consecuencia, la mejora observada de 11,134.13 TPD a 13,541.40 TPD debe analizarse dentro de un contexto operacional integral. La contribución de la malla N.º 6 se sustenta principalmente en la reducción del desplazamiento máximo de 10.00 mm a 5.00 mm, mayor intervalo de cambio y menor necesidad de intervención, indicadores relacionados con la estabilidad y continuidad operativa.

4.3. Discusión de resultados

La discusión de resultados se desarrolla en función del objetivo general y de los objetivos específicos de la investigación, con la finalidad de relacionar los hallazgos obtenidos con el comportamiento geomecánico del macizo rocoso RMR 40, la respuesta del sostenimiento frente a los efectos de la voladura y la continuidad operativa de las labores subterráneas.

En relación con el objetivo general, orientado a optimizar el sostenimiento geomecánico en minas subterráneas con macizo rocoso RMR 40 para garantizar el avance operativo continuo, los resultados evidencian que la malla electrosoldada N.º 6 presenta un mejor desempeño técnico y operativo frente a la malla electrosoldada N.º 8. La producción promedio aumentó de 11,134.13 TPD a 13,541.40 TPD, lo que representa una mejora de 21.62 %. Asimismo, el desplazamiento máximo del macizo rocoso disminuyó de 10.00 mm a 5.00 mm, equivalente a una reducción del 50.00 %. Estos resultados indican que la optimización del sostenimiento no solo mejora la estabilidad de la excavación, sino que también favorece la continuidad del ciclo operativo, al reducir la deformación visible del macizo y disminuir la necesidad de intervenciones correctivas frecuentes.

Desde el punto de vista geomecánico, el comportamiento observado se explica por las

condiciones propias de un macizo rocoso RMR 40, el cual presenta fracturamiento, discontinuidades, menor competencia estructural y mayor susceptibilidad a desplazamientos después de los procesos de perforación y voladura. En estas condiciones, el sostenimiento superficial debe cumplir una función de retención, confinamiento y control de bloques sueltos. La malla N.º 8, al presentar mayor abertura y menor robustez relativa, mostró limitaciones frente al control de deformaciones, mientras que la malla N.º 6, por su mayor calibre y menor abertura de cocada, permitió mejorar la capacidad de retención y reducir el desplazamiento del contorno rocoso.

En relación con el primer objetivo específico, referido a analizar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso RMR 40 e identificar los factores que influyen en la selección de la malla de sostenimiento, los resultados permiten confirmar que la clasificación geomecánica del macizo constituye un criterio técnico determinante para definir el tipo de sostenimiento. El RMR 40 corresponde a una condición de roca mala o clase IV, ubicada en el límite superior de esta categoría, donde la estabilidad de la labor puede verse afectada por discontinuidades, fracturamiento, humedad y daño inducido por voladura. Por ello, la selección de la malla no debe realizarse únicamente por estandarización operativa o disponibilidad de materiales, sino considerando la capacidad del sostenimiento para controlar deformaciones, resistir el impacto de fragmentos desprendidos y mantener la sección de la labor en condiciones seguras.

Los resultados muestran que el desplazamiento máximo con malla N.º 8 fue de 10.00 mm, mientras que con malla N.º 6 se redujo a 5.00 mm. Esta diferencia demuestra que, bajo condiciones de macizo RMR 40, la malla N.º 6 responde mejor a las exigencias de estabilidad superficial. En términos geomecánicos, una menor deformación indica que el sistema de sostenimiento logra controlar con mayor eficiencia la relajación del macizo después de la excavación y reduce la probabilidad de desprendimientos en zonas fracturadas. Por tanto, el

primer objetivo específico se relaciona directamente con la necesidad de seleccionar una malla más resistente y con mejor capacidad de confinamiento para labores expuestas a deformación y daño por voladura.

En relación con el segundo objetivo específico, orientado a evaluar el desempeño de la malla electrosoldada N.º 8 como sostenimiento actualmente estandarizado, los resultados evidencian que este sistema cumple una función de sostenimiento básico, pero presenta limitaciones técnicas frente a las condiciones reales del macizo rocoso RMR 40. La malla N.º 8 registró una producción promedio de 11,029.96 TPD, un desplazamiento máximo de 10.00 mm, un intervalo de cambio de 1.50 años y un costo anualizado de 8.49 USD/m²-año. Estos valores muestran que, aunque la malla N.º 8 puede ser aplicada en labores subterráneas, su menor vida útil y mayor deformación generan mayor exposición a reposiciones, mantenimiento y posibles interrupciones del ciclo de minado.

La respuesta de la malla N.º 8 frente a los efectos de la voladura resulta relevante, debido a que la energía liberada durante la detonación puede generar vibraciones, apertura de discontinuidades, aflojamiento del contorno rocoso y desprendimiento de fragmentos. En este contexto, el desplazamiento de 10.00 mm indica una mayor sensibilidad del sistema frente a la deformación posterior a la voladura. Esta condición puede comprometer la continuidad operativa, porque obliga a realizar inspecciones, reparaciones o reposiciones de sostenimiento con mayor frecuencia, afectando el avance normal de las actividades de perforación, voladura, limpieza y sostenimiento.

En relación con el tercer objetivo específico, referido a proponer una alternativa de optimización en la selección y aplicación de la malla de sostenimiento, los resultados respaldan técnicamente la implementación de la malla electrosoldada N.º 6. Esta alternativa permitió aumentar el intervalo de cambio de 1.50 a 3.00 años, lo que representa una mejora del 100.00 % en la duración del sistema instalado. Asimismo, el costo anualizado por reposición

disminuyó de 8.57 a 5.29 USD/m²-año, equivalente a una reducción de 38.24 %. Estos resultados demuestran que, aunque la malla N.º 6 presenta mayor costo directo y mayor tiempo inicial de intervención, su mayor vida útil permite compensar dichos incrementos.

El costo directo promedio de la malla N.º 6 fue de 15.90 USD/m², superior al costo de la malla N.º 8, que fue de 12.73 USD/m². Sin embargo, esta diferencia no debe evaluarse de manera aislada, ya que el análisis técnico del sostenimiento requiere considerar el ciclo de vida del material, la frecuencia de reposición, el control de deformaciones y la continuidad operativa. Desde esta perspectiva, la malla N.º 6 resulta más favorable, debido a que reduce el desplazamiento del macizo, prolonga el intervalo de cambio y disminuye el costo anualizado. Por tanto, la alternativa propuesta no solo responde a un criterio de resistencia, sino también a un criterio de eficiencia operativa.

La prueba de hipótesis refuerza la interpretación técnica de los resultados. Para la producción se obtuvo un valor de $p = 0.004$, menor al nivel de significancia de 0.05, lo que indica una diferencia estadísticamente significativa entre la malla N.º 8 y la malla N.º 6. De igual manera, para el desplazamiento del macizo rocoso se obtuvo un valor de $p = 0.002$, confirmando que la reducción del desplazamiento con la malla N.º 6 no responde a una variación casual, sino a una mejora medible en el comportamiento del sostenimiento. En cambio, el costo de sostenimiento presentó un valor de $p = 0.321$, mayor a 0.05, lo cual indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa en los costos evaluados entre ambas mallas.

Estos resultados permiten interpretar que la malla N.º 6 mejora los indicadores técnicos más vinculados con la estabilidad y la continuidad operativa, sin generar una diferencia significativa en el costo de sostenimiento. En términos prácticos, esto significa que la unidad minera puede obtener mayor estabilidad, menor desplazamiento y mayor producción sin comprometer de manera significativa el presupuesto operativo del sostenimiento. Esta

condición fortalece la viabilidad técnica de la propuesta.

En cuanto a la continuidad operativa, la mejora del índice producción/desplazamiento de 1,103.00 TPD/mm con malla N.º 8 a 2,713.20 TPD/mm con malla N.º 6 evidencia un mayor rendimiento operativo por cada milímetro de deformación registrado. Este indicador permite relacionar directamente la estabilidad geomecánica con la productividad minera, demostrando que una menor deformación del macizo favorece un desarrollo más regular de las actividades subterráneas. En otras palabras, el sostenimiento optimizado contribuye a reducir las interrupciones derivadas de deformaciones, desprendimientos o mantenimiento correctivo.

Los resultados obtenidos guardan relación con lo señalado por Wu et al. (2024), quienes evidenciaron que la clasificación geomecánica del macizo no debe limitarse al valor RMR, sino que debe complementarse con indicadores de comportamiento posterior a la excavación. En la presente investigación, esta afirmación se confirma porque el macizo RMR 40 no fue evaluado únicamente por su clasificación, sino también mediante desplazamiento máximo, intervalo de cambio, producción y costo anualizado. La reducción del desplazamiento de 10.00 mm con malla N.º 8 a 5.00 mm con malla N.º 6 demuestra que el control post-voladura es un criterio decisivo para seleccionar el sostenimiento superficial.

Asimismo, los resultados coinciden con Terron-Almenara et al. (2023), quienes sostienen que los métodos empíricos de clasificación deben complementarse con la evaluación del comportamiento real del terreno y del soporte instalado. En esta tesis, la malla N.º 8 representa una solución estandarizada que, aunque cumple una función básica de retención, no ofrece el mismo desempeño que la malla N.º 6 frente a deformaciones del contorno rocoso. Esto evidencia que en macizos de baja calidad, como el RMR 40, el sostenimiento debe seleccionarse considerando desempeño operativo y no solo criterios de uso habitual.

De igual manera, los hallazgos se relacionan con Arimana Rojas y Palomino Condori (2023), quienes demostraron que la calidad del macizo rocoso y el tipo de sostenimiento

influyen directamente en la seguridad minera. En la presente investigación, la reducción del desplazamiento máximo en 50.00 % y el aumento del intervalo de cambio de 1.50 a 3.00 años indican que la malla N.º 6 ofrece una mayor capacidad de control superficial, lo cual puede reducir intervenciones correctivas y favorecer la continuidad del ciclo de minado.

Frente a lo reportado por Ticona Josec (2019) y Salazar Isla (2020), se confirma que el sostenimiento debe responder a las condiciones geomecánicas específicas de cada labor. Estos autores plantearon sistemas de sostenimiento diferenciados según la calidad del macizo, mientras que la presente investigación demuestra que, aun dentro de un mismo sistema superficial de mallas, el calibre y la abertura influyen en la respuesta técnica del sostenimiento. Por ello, la optimización no se limita a reemplazar un material por otro, sino a seleccionar la malla en función del desplazamiento, vida útil, costo anualizado y respuesta post-voladura.

En síntesis, la discusión de resultados permite afirmar que la malla electrosoldada N.º 6 constituye una alternativa técnica más adecuada para labores subterráneas con macizo rocoso RMR 40. Su aplicación mejora el control del desplazamiento, incrementa la producción promedio, prolonga el intervalo de cambio y reduce el costo anualizado por reposición. Aunque requiere mayor inversión inicial y mayor tiempo de instalación, estos aspectos se compensan con una mayor estabilidad del sistema y una menor frecuencia de intervención. Por ello, la optimización del sostenimiento mediante malla N.º 6 contribuye directamente a garantizar el avance operativo continuo en la unidad minera evaluada.

CONCLUSIONES

- En relación con el objetivo general, se concluye que la optimización del sostenimiento geomecánico mediante la comparación técnico-operativa entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6 mejora la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y contribuye al avance operativo continuo. La malla electrosoldada N.º 6 incrementó la producción promedio de 11,134.13 TPD a 13,541.40 TPD, redujo el desplazamiento máximo de 10.00 mm a 5.00 mm y duplicó el intervalo de cambio de 1.50 a 3.00 años.
- Respecto al primer objetivo específico, se concluye que las condiciones geomecánicas del macizo RMR 40 influyen directamente en la selección de la malla de sostenimiento. El fracturamiento, las discontinuidades, la humedad y los efectos post-voladura incrementan la necesidad de una malla con mayor capacidad de retención y mejor control de desplazamientos.
- Respecto al segundo objetivo específico, se concluye que la malla electrosoldada N.º 8 cumple una función de sostenimiento superficial, pero presenta limitaciones frente a las exigencias del macizo RMR 40. Estas limitaciones se evidencian en un mayor desplazamiento máximo, menor intervalo de cambio y menor rendimiento producción/desplazamiento en comparación con la malla N.º 6.
- Respecto al tercer objetivo específico, se concluye que la malla electrosoldada N.º 6 presenta mejor desempeño técnico-operativo que la malla N.º 8, principalmente por reducir el desplazamiento máximo en 50.00 %, duplicar el intervalo de cambio y mejorar el índice producción/desplazamiento en 145.98 %. Aunque su costo directo fue mayor, el costo anualizado por reposición disminuyó de 8.57 a 5.29 USD/m²-año.
- Respecto al cuarto objetivo específico, se concluye que los criterios técnicos para optimizar la selección de malla deben considerar RMR, fracturamiento, respuesta post-voladura, desplazamiento máximo, intervalo de cambio, costo directo, costo anualizado

y continuidad operativa. Estos criterios permiten evitar decisiones basadas solo en estandarización y favorecen un sostenimiento más confiable para labores subterráneas con macizo RMR 40.



RECOMENDACIONES

- Implementar la malla electrosoldada N.º 6 en labores con macizo rocoso RMR 40 donde se evidencien mayor fracturamiento, desplazamientos post-voladura o alta frecuencia de reposición, siempre bajo supervisión geomecánica y control de calidad de instalación.
- Actualizar el procedimiento de selección de malla incorporando indicadores técnicos y económicos: desplazamiento máximo, intervalo de cambio, tiempo de intervención, costo directo, costo anualizado y producción/desplazamiento.
- Fortalecer el registro sistemático de producción, costos, desplazamientos y tiempos de intervención, a fin de contar con una base histórica homogénea que permita evaluar periódicamente el desempeño del sostenimiento instalado.
- Fortalecer el monitoreo post-voladura mediante fichas de inspección geomecánica, registro fotográfico, medición periódica de desplazamientos y seguimiento de desprendimientos, para validar la eficacia del sostenimiento implementado.
- Actualizar periódicamente los criterios geomecánicos de selección de sostenimiento, incorporando nuevos registros de campo, condiciones post-voladura y desempeño real de las mallas instaladas.

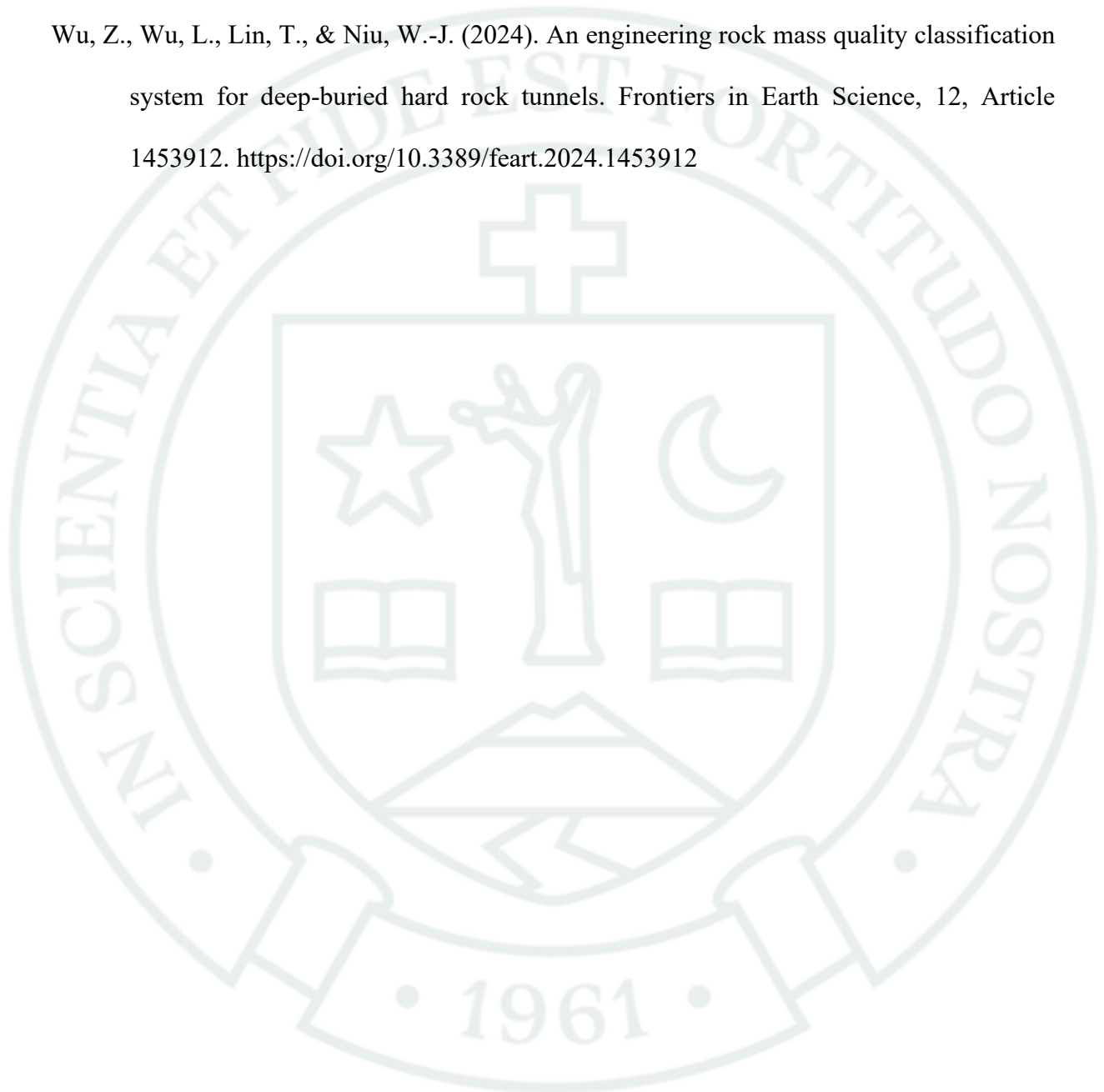
REFERENCIAS

- Arimana Rojas, L. E., & Palomino Condori, Y. J. (2023). Evaluación geomecánica para el diseño de sostenimiento de la zona de producción norte Unidad Minera Parcoy La Libertad - 2022 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional UNH. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/58091ba1-7ff0-4b66-b81a-4fdd636091fb>
- Benel Rivera, B. A. (2020). Comportamiento geomecánico según los métodos RMR y Q de Barton del nivel 3 de la mina Paredones San Pablo - Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3942>
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- Brousset, J., Pehovaz, H., Quispe, G., Raymundo, C., & Moguerza, J. M. (2023). Rock mass classification method applying neural networks to minimize geomechanical characterization in underground Peruvian mines. *Energy Reports*, 9, 376-386. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.246>
- Chen, J., Yang, T., Zhang, D., Huang, H., & Tian, Y. (2021). Deep learning based classification of rock structure of tunnel face. *Geoscience Frontiers*, 12(1), 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.04.003>
- Díaz Chiguay, L. A. P., Huamani Montalvo, F. J., Macedo Franco, L. D., & Velarde Lam, D. M. (2025). Geomechanical model proposal for optimizing ramp design in an underground gold mine at Yanaquihua, 2024. Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. <https://proceedings.laccei.org/index.php/laccei/article/download/3727/3718/7262>

- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (2000). Support of underground excavations in hard rock. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16978>
- Luza, C., Mango, F., Castillo, J., Cervantes, D., Ccalachua, R., & Tunquipa, A. (2023). Caracterización del macizo rocoso de las canteras de Añashuayco. Libro de Resúmenes IX FIPVO, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 382-388. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4549>
- Niu, G., He, X., Xu, H., & Dai, S. (2024). Development of rock classification systems: A comprehensive review with emphasis on artificial intelligence techniques. Eng, 5(1), 217-245. <https://doi.org/10.3390/eng5010012>
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2017). Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Osinergmin. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf
- Potvin, Y., & Hadjigeorgiou, J. (2020). Ground support for underground mines. Australian Centre for Geomechanics. https://acg.uwa.edu.au/wp-content/uploads/2020/07/GSSO-Book_sample_01_04_2020_2.pdf
- Salazar Isla, E. S. (2020). Evaluación geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en tajeos de explotación por el método de corte y relleno ascendente Unidad Minera Yauricocha - Sociedad Minera Corona S.A. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8428>
- Terron-Almenara, J., Holter, K. G., & Høien, A. H. (2023). A hybrid methodology of rock support design for poor ground conditions in hard rock tunnelling. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56, 4061-4088. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03273-8>

Ticona Josec, G. (2019). Evaluación geomecánica para el diseño de sostenimiento en la galería de acceso y rampa 430-E de la empresa minera S.M. POWER S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/16007>

Wu, Z., Wu, L., Lin, T., & Niu, W.-J. (2024). An engineering rock mass quality classification system for deep-buried hard rock tunnels. *Frontiers in Earth Science*, 12, Article 1453912. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1453912>



ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Preguntas General	Objetivos General	Hipótesis General	Metodología
¿En qué medida la optimización del sostenimiento geomecánico, mediante la comparación técnico-operativa entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6, mejora la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y contribuye al avance operativo continuo en una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026?	Determinar en qué medida la optimización del sostenimiento geomecánico, mediante la comparación técnico-operativa entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6, mejora la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y contribuye al avance operativo continuo en una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026	La optimización del sostenimiento geomecánico mediante la aplicación de criterios técnico-operativos de selección entre malla electrosoldada N.º 8 y malla electrosoldada N.º 6 mejora significativamente la estabilidad del macizo rocoso RMR 40 y el avance operativo continuo en una unidad minera de Pasco, con aplicación al periodo 2026.	Tipo: Aplicada. Nivel: Comparativo-explicativo. Método: Analítico-comparativo y deductivo. Diseño: No experimental, longitudinal, comparativo y de campo. Población: Labores subterráneas de una unidad minera ubicada en Pasco con condiciones geomecánicas asociadas a macizo rocoso RMR 40.
Específicos	Específicos	Específicos	
¿Cuáles son las condiciones geomecánicas del macizo rocoso RMR 40 en las labores subterráneas evaluadas y cómo influyen en la selección de la malla de sostenimiento? ¿Cuál es el desempeño técnico y operativo de la malla electrosoldada N.º 8 frente a los efectos post-voladura, el desplazamiento del macizo, los costos y los tiempos de intervención? ¿Qué diferencias presentan la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6 en términos de estabilidad, producción, costos anualizados, intervalo de cambio y desplazamiento máximo? ¿Qué criterios técnicos deben considerarse para optimizar la selección y aplicación de la malla de sostenimiento en labores con macizo rocoso RMR 40?	- Caracterizar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso RMR 40 en las labores subterráneas evaluadas, considerando fracturamiento, discontinuidades, humedad, efectos post-voladura y desplazamiento del contorno rocoso. - Evaluar el desempeño técnico y operativo de la malla electrosoldada N.º 8 como sostenimiento estandarizado, mediante indicadores de producción, costo directo, intervalo de cambio, tiempo de intervención y desplazamiento máximo. - Comparar el comportamiento de la malla electrosoldada N.º 8 y la malla electrosoldada N.º 6 para determinar diferencias en estabilidad geomecánica, continuidad operativa, costo anualizado y control de desplazamientos. - Formular criterios técnicos de optimización para la selección y aplicación de la malla de sostenimiento en labores subterráneas con macizo rocoso RMR 40,	Hipótesis Específica 1: Las condiciones geomecánicas del macizo rocoso RMR 40, caracterizadas por fracturamiento, discontinuidades, humedad y efectos post-voladura, influyen directamente en la selección de la malla de sostenimiento. Hipótesis Específica 2: La malla electrosoldada N.º 8 presenta limitaciones técnicas frente al control de desplazamientos y la continuidad operativa en labores con macizo rocoso RMR 40. Hipótesis Específica 3: La malla electrosoldada N.º 6 presenta mejor desempeño que la malla N.º 8 en estabilidad geomecánica, producción, intervalo de cambio y control de desplazamientos, aunque su costo directo inicial sea mayor. Hipótesis Específica 4: Los criterios de selección basados en desplazamiento, vida útil, costo anualizado, respuesta post-voladura y continuidad	Muestra: Labores seleccionadas de manera no probabilística intencional que presentan uso de malla N.º 8, posibilidad de comparación con malla N.º 6, exposición a voladura y disponibilidad de registros operativos. Técnicas: Observación directa, revisión documental, análisis de registros geomecánicos, reportes de voladura, registros de producción, costos, mantenimiento y medición de desplazamientos.

	orientados a reducir interrupciones y sostener el avance operativo continuo	operativa permiten optimizar la aplicación de la malla de sostenimiento en labores con macizo RMR 40	
--	---	--	--



Anexo 2. Ficha Técnica de malla Electrosoldada N° 6 cocada 3"x3" y N° 8 4"x4"



434 – FT | Versión: N°02 – 2024 | Fecha: 25-04-2025 | Código de plano: MES-537



Descripción

Están conformadas por barras lisas, laminadas en frío, que se cruzan en forma ortogonal, las cuales están soldadas en todas sus intersecciones. La malla cumple la función principalmente de sostenimiento en minería subterránea.

Norma

- ASTM – A 82 Especificación estándar para alambre de acero, liso, para refuerzo de hormigón.
- ASTM – A 185 Especificación estándar para malla de alambre electrosoldada, lisa, para refuerzo de hormigón.
- NTP E.60 7.4.2 – Norma Técnica de Edificaciones E.060 Concreto Armado

Especificaciones técnicas

Diámetro		Resistencia a la Tracción	Fluencia	Doblez	Cocada	Peso
Calibre	Tolerancia (+/-)	mínima	mínima	#	Pulg.	Aprox.
BWG	mm	Kg/mm ²	Kg/mm ²	-	-	Kg
#6	+/- 0.08	56	50	2Ø	3 x 3	34.47

Ancho		Largo		Sobrelargos de Alambres Transversales	Espaciamientos de Alambres Individuales	Resistencia al Cizalle de la Soldadura
Nominal	Tol (+/-)	Nominal	Tol (+/-)	Tol (+/-)	Tol (+/-)	mínima
m	mm	m	%	mm	mm	N
2.40	+/- 13	3.20	-0/+1	+/- 13	+/- 6.35	241 x A (mm ²)

A = Área nominal del alambre más grueso.

Embalaje y etiquetado

- En planchas y se encuentran identificadas con una tarjeta con la descripción del producto.

Malla ELECTROSOLDADA

Descripción del Producto

Las mallas Electrosoldadas FORMIN, son estructuras de acero planas formadas por barras de acero lisas o corrugadas, dispuestas en forma ortogonal y electrosoldadas en todos los puntos de encuentro. Se presentan en una gran cantidad de secciones, cuadrículas y diámetros de acero, según su aplicación final.

Como elemento de refuerzo, en excavaciones subterráneas para labores temporales.

Ventajas

- ❖ Fundaciones o cimientos.
- ❖ Viviendas, losas, muros, tabiques.
- ❖ Pisos, pavimentos.
- ❖ Protecciones, cercos, rejas.
- ❖ Terrenos, estabilización de taludes y estratos rocosos
- ❖ Elementos pre-fabricados, placas, tubos, piletas.
- ❖ Túneles, caída de rocas, refuerzo de Shotcrete.



Características técnicas

- ❖ Malla Electrosoldada construida con procesos totalmente automatizados, que le confieren una gran estabilidad dimensional.
- ❖ Se presentan en rollos de varias dimensiones.
- ❖ Proceso de soldadura por contacto, que aporta uniones limpias sin rebabas ni exceso de material.
- ❖ Distintas dimensiones de cuadrícula en función de los niveles de resistencia y cerramientos requeridos.

Norma técnica del material

Las propiedades mecánicas y composición química, según Norma ASTM A1064 – A497.

Identificación del material

Cada rollo o paquete es identificado mediante una tarjeta, donde se indica lo siguiente:

- Fecha, dimensiones, alambre, calibre, cocada, colada, turno de fabricación, maquina, rollo o panel, tipo de producto ya sea liso o corrugado.

Malla ELECTROSOLDADA

Propiedades mecánicas

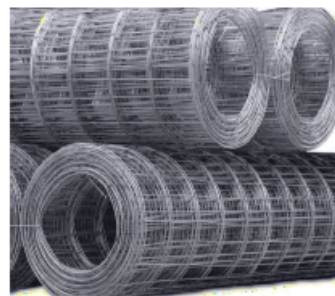
Según norma ASTM A82 / ASTM A1064

- Limite elástico = 485 MPa min.
- Resistencia a la tracción = 550 MPa min.
- Elongación 8% min.

Composición química

Análisis Típico en %, según norma ASTM A82.

Norma Grado	Carbono (C) %	Manganeso (Mn) %	Fósforo (P) %	Azufre (S) %
ASTM A-82/ASTM 1064	<0.30	<1.0	0.045	0.050



Presentación del producto

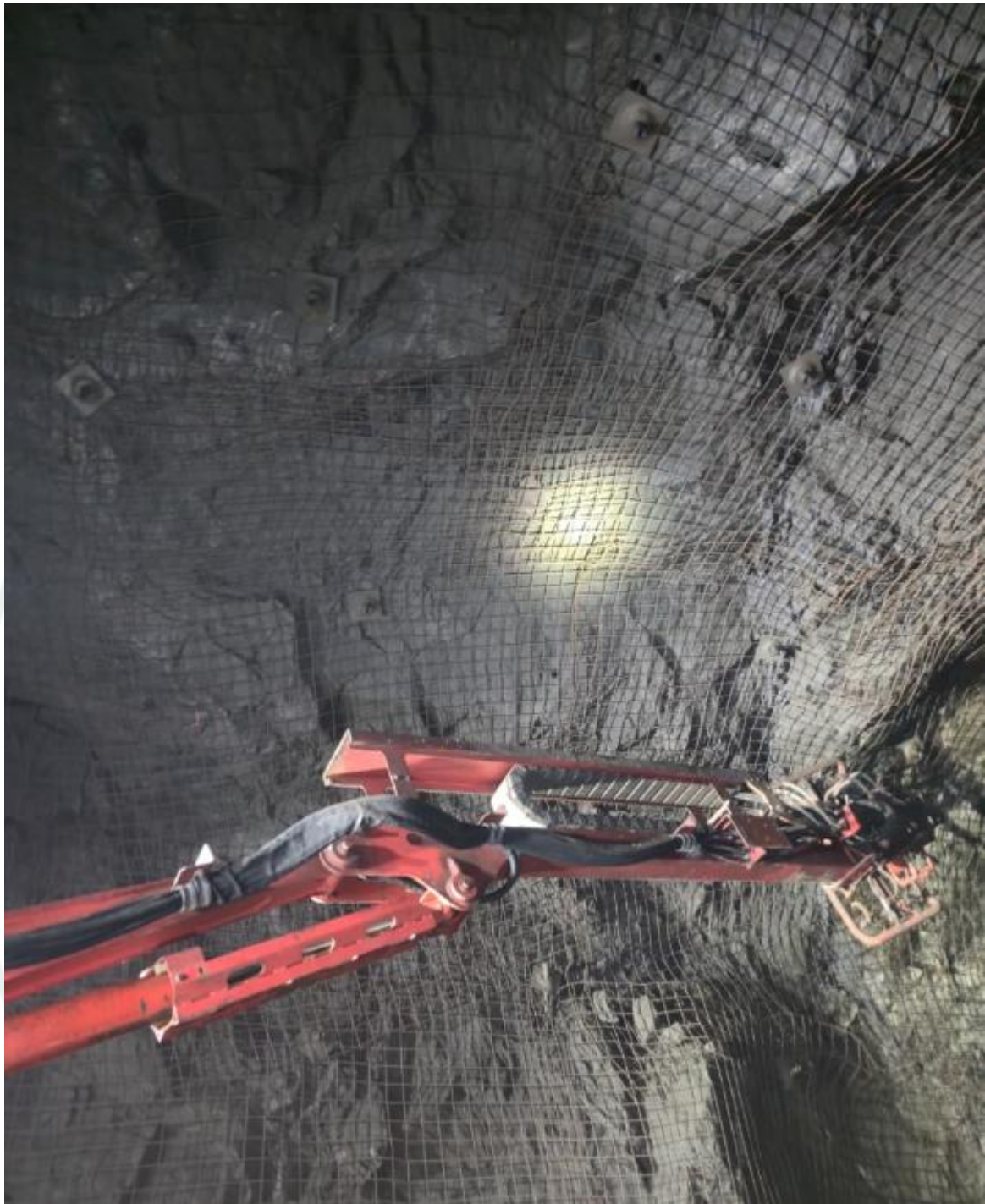
Las mallas electrosoldadas, se fabrica en alambón de diferentes diámetros corrugado o liso, galvanizada y no galvanizada; en rollos de distintas dimensiones de acuerdo a la solicitud del cliente.

MALLA ELECTROSOLDADA EN ROLLOS					
Tipo	Diámetro de alambre	Separación (mm)		Dimensiones	Peso (Kg)
		Longitudinal	Transversal		
ME-4X4 N°08	4.2	100	100	2.02 x 25 m	112
ME-4X4 N°08	4.2	100	100	2.4 x 25 m	130
ME-3X3 N°08	4.2	75	75	2.0 x 25 m	141
ME-3X3 N°08	4.2	75	75	2.4 x 25 m	150
ME-4X4 N°10	3.4	100	100	2.42 x 25 m	95
ME-4X4 N°10	3.4	100	100	2.02 x 25 m	78
ME-3X3 N°10	3.4	75	75	2.02 x 25 m	100
ME-3X3 N°10	3.4	75	75	2.42 x 25 m	121

** Medidas especiales solicitados por el cliente

Anexo 3: Panel fotográfico









Criterio técnico	Malla N.º 8	Malla N.º 6	Implicancia técnica	Fuente de evaluación
Calibre del alambre	Menor diámetro relativo	Mayor diámetro relativo	Mayor capacidad resistente y retención superficial	Ficha técnica y registros de sostenimiento
Abertura de cocada	4 x 4 pulgadas	3 x 3 pulgadas	Menor probabilidad de paso de fragmentos rocosos	Ficha técnica de malla
Control de deformación	Desplazamiento máximo 10 mm	Desplazamiento máximo 5 mm	Mejor control del movimiento del contorno	Mediciones de campo
Intervalo de cambio	1.50 años	3.00 años	Mayor vida útil operativa	Registros de mantenimiento
Costo anualizado	8.57 USD/m ² -año	5.29 USD/m ² -año	Menor costo considerando ciclo de vida	Análisis económico