



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE LAS LABORES MINERAS SUBTERRÁNEAS EN LA MINA COCABAL-ANCASH – 2019”

Trabajo de suficiencia profesional para optar al título
profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Orlando Josue Valverde Vargas

Asesor:

Mg. Elizabeth Catheline Mejía Narro

<https://orcid.org/0000-0003-3282-7582>

Trujillo - Perú

2025

Informe de Similitud



Página 2 of 70 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega tm:old:1:3282349222




10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe


- Bibliografía
- Texto citado

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
13 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Gracias al Todopoderoso, por haber estado conmigo
en cada paso del camino, guiándome,
protegiéndome y fortaleciéndome para alcanzar
esta meta.

Con mucho cariño a mis familiares,
por su soporte constante, por su comprensión y
sabios consejos. Gracias por estar siempre a mi
lado y ser mi fuerza en cada etapa de este camino.

A ustedes, mi adorada familia, les
dedico con gratitud este
logro.

Agradecimiento

Esta tesis es fruto del trabajo, la perseverancia y el compromiso, no solo de quien lo escribe, sino también del apoyo incondicional de muchas personas que, con generosidad y sin esperar nada a cambio, aportaron de diversas maneras a su desarrollo. A todos ellos, mi más profundo agradecimiento por ser parte fundamental de este logro.

Dedico esta tesis con todo mi corazón a mis padres, a mi esposa y a mi hija, quienes han sido mi mayor inspiración y fortaleza. Gracias por su amor, cariño, comprensión y por creer siempre en mí, incluso en los momentos más difíciles. Los adoro profundamente y este logro también es de ustedes.

Agradezco a Dios por brindarme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para realizar esta investigación, que representa la culminación de una importante meta en mi vida. Su guía ha sido fundamental en cada paso de este camino.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesora, Mg. Elizabeth Catheline Mejía Narro, por su valiosa orientación, dedicación y asesoría constante durante el desarrollo de esta investigación.

Tabla de contenido

INDICE DE TABLAS.....	7
INDICE DE FIGURAS.....	8
INDICE DE ECUACIONES.....	9
RESUMEN EJECUTIVO.....	10
CAPITULO I INTRODUCCION.....	11
CAPITULO II MARCO TEORICO.....	21
CAPITULO III DESCRPCION DE LA EXPERIENCIA.....	24
CAPITULO IV RESULTADOS.....	26
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	42
REFERENCIAS.....	44
ANEXO	47

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 Grado de Meteorizacion de la Matriz Rocosa.....	27
TABLA 2 Resistencia de la Roca a la Compresion simple.....	28
TABLA 3 Separacion de Discontinuidades de la Roca Maciza.....	29
TABLA 4 Persistencia de las Continuidades de la Roca Maciza.....	30
TABLA 5 Abertura de las Discontinuidades de la Roca Maciza.....	32

Índice de Figuras

Figura 1 Formas de la matriz intacta	26
Figura 2 Orientación de la Discontinuidad	29
Figura 3 Rugosidad de la Discontinuidad.....	31
Figura 4 Elasticidad	33
Figura 5 Plasticidad	34
Figura 6 Maleabilidad.....	34
Figura 7 Ductilidad.....	35
Figura 8 Dureza	36
Figura 9 Tenacidad	37
Figura 10 Fragilidad	37
Figura 11 Cálculo del RQD.....	39
Figura 12 Descripción del RMR.....	40

Índice de ecuaciones

Rock Quality Designation - RQD -----	38
Rock Mass Rating - RMR -----	40
Tunnel Quality Index - Q-----	41

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio aborda una problemática actual relacionada con las evaluaciones geomecánicas en labores de minería subterránea, específicamente en la Minera Cocabal. La finalidad del estudio es evaluar las propiedades y consistencia del cuerpo rocoso en las zonas de extracción subterránea, mediante la aplicación de métodos geomecánicos adecuados.

La metodología empleada se enmarcó en un enfoque No Experimental, Descriptivo y Explicativo, permitiendo evaluar la resistencia y característica de la roca desde el enfoque geomecánico.

Entre los principales resultados obtenidos, se identificaron las propiedades estructurales de la roca, como la discontinuidad, anisotropía y heterogeneidad, así como sus propiedades geomecánicas fundamentales (elasticidad, plasticidad, maleabilidad, ductilidad, dureza, tenacidad y fragilidad). Tales características fueron determinadas mediante técnicas de análisis in situ y ensayos complementarios.

Las evaluaciones geomecánicas se realizaron aplicando tres sistemas reconocidos internacionalmente:

- (RQD) Rock Quality Designation
- (RMR) Rock Mass Rating
- (Q) Tunnel Quality Index

La aplicación de estos sistemas permitirá a la empresa:

- Proponer alternativas de explotación en futuras zonas del yacimiento.
- Validar y ajustar las suposiciones técnicas realizadas durante la fase de diseño inicial de labores.
- Optimizar las decisiones para acreditar la seguridad operativa y estructural de las excavaciones.

Como propuesta de mejora, se recomienda implementar de forma sistemática la evaluación geomecánica mediante RMR y GSI, complementada con capacitaciones programadas al personal operativo. Asimismo, se sugiere continuar con la práctica de realizar charlas informativas de 5 minutos antes del inicio de cada jornada laboral, con el fin de reforzar la cultura de seguridad y el conocimiento geotécnico en el equipo de trabajo.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La zona minera representa uno de los cimientos fundamentales de la economía en Colombia, no solo por aportar al Producto Interno Bruto (PIB), sino también por su efecto en el desarrollo regional y en la creación de empleo. Sin embargo, también es reconocido como uno de los sectores con mayor incidencia de accidentes laborales, principalmente ocasionados por la caída de rocas durante las actividades de perforación, voladura y extracción de minerales. Esta problemática evidencia la necesidad urgente de implementar mecanismos técnicos que permitan mitigar los riesgos asociados a la falla estructural de la formación rocosa en labores subterráneas.

En este contexto, las evaluaciones geomecánicas adquieren una relevancia crucial, ya que permiten caracterizar el comportamiento de la roca y establecer condiciones de seguridad adecuadas para las zonas de explotación. Dichas evaluaciones contribuyen significativamente a la prevención de accidentes, garantizando la integridad de los trabajadores y la eficiencia en las operaciones mineras.

La minería en Colombia se concentra principalmente en las regiones norte, centro y occidente del país, con un total de 9,602 títulos mineros registrados en departamentos como (Bogotá, Antioquia, Ibagué, Cúcuta, Bucaramanga, Cartagena, Manizales, Cali, Valledupar, Medellín, Pasto y Quibdó). El país posee un portafolio amplio de proyectos orientados a la extracción de recursos como oro, cobre, plata, esmeraldas y carbón.

En cuanto a los proyectos mineros de oro, destacan iniciativas como el Proyecto Buriticá, con una financiación de US\$ 780 millones, cuyas operaciones iniciaron en febrero de 2020; el Proyecto Cisneros, con una financiamiento de US\$ 75,5 millones y operación desde julio de 2019; y el Proyecto El Limón, con una subvención de US\$ 7 millones, actualmente en fase de explotación, entre otros (Agencia Nacional de Minería, 2021).

El Perú es un país rico en minerales, dentro de los diversos minerales que produce tenemos: oro, plata, cobre, estaño, molibdeno, telurio, plomo, zinc, hierro, entre otros, generando ingresos económicos de gran potencia a la economía del país, los minerales podrían exportarse a mercados como (Estados Unidos, China, Suiza, Japón, Canadá y la Unión Europea). Cuenta con proyección de inversiones en extracción y expansión minera por el importe de US\$ 56 158 mil millones, ubicados en los departamentos de (Cuzco, Cajamarca, Moquegua, Tacna, Ica, Lima, Arequipa, Junín, Piura, Ancash, Huancavelica y Lambayeque). (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

En la Región Áncash, La minería representa cerca de la mitad del PBI regional y en 2024 este sector cayo 3.7% acumulado dos años consecutivos de retroceso. La producción del zinc se redujo en 34.8 y la de plata en 3.1. En el caso del cobre, el

“Evaluación Geomecánica para mejorar la estabilidad de las labores mineras subterráneas en La Mina Cocabal-Ancash – 2019”
crecimiento fue marginal (+0.01%) debido a las bajas leyes minerales – es decir, una menor cantidad de metal por tonelada extraída, afectando principalmente Antamina.

A pesar de ello, Ancash sigue siendo la Región número uno en producción de zinc y la tercera en plata y cobre a nivel nacional. Sin embargo, esa posición puede ser frágil. Victor Gobitz, expresidente de la CNMPE, advierte que, sino se desarrollan nuevos proyectos de gran escala o se expanden las minas existentes, la producción minera Regional podría seguir disminuyendo. Gobitz, V. (2024). Entrevista sobre perspectivas mineras en Áncash. Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía.

La explotación de piedra ornamental en España tiene gran relevancia, destacando como unas de las principales actividades industriales en el noroeste de España. Esta relevancia justifica la preservación de estas industrias, aunque los requerimientos técnicos y ambientales para su continuidad sean cada vez más estrictos. El objetivo principal de este artículo es estimar y examinar el valor de K_0 del macizo rocoso donde se encuentra la mina. A partir de un valor inicial de K_0 previamente determinado, se recopilaban datos en terreno utilizando el sistema de gato plano o “Jack-flat”.

Posteriormente, estos datos fueron analizados mediante el software Rocscience RS2, en donde se emplea el método de elementos finitos (FEM). A través del proceso iterativo, se buscó establecer una relación entre el valor de K_0 y la razón S_{xx}/S_{yy} .

El enfoque se orienta hacia el aspecto técnico del diseño de las cámaras, lo cual ha hecho posible la continuidad en la extracción de material rocoso mediante la explotación subterránea de yacimientos que anteriormente eran trabajados a cielo abierto en canteras. La dimensión de las cámaras incide directamente en los costos operativos, y un adecuado diseño del sostenimiento permite garantizar una mayor eficiencia y seguridad. Por ello, conocer con precisión el valor de K_0 resulta fundamental para dimensionar correctamente el sostenimiento de las cavidades de explotación. El método propuesto representa una simplificación respecto al procedimiento tradicional para calcular el valor original de K_0 del terreno. Pérez, J., & González, M. (2023). Determinación del valor de K_0 en macizos rocosos mediante métodos numéricos y experimentales en minas subterráneas de roca ornamental. *Revista de Ingeniería Geotécnica*, 19(2), 45–58.

En ese contexto, La Mina Cocabal, se encuentra dentro de la Cuenca del Santa, dedicada a la explotación del carbón, siendo una Mina dentro de las más importantes en el Perú que datan desde 1855 hasta hace algunos años. Su capacidad de producción de la Mina Cocabal, alcanzó las 250 Ton/día; casi la totalidad de su producción fue para la exportación al mercado argentino y ocasionalmente a Francia. Durante estos 14 años “Cocabal” produjo 402,051 Toneladas de carbón bruto según el INGEMMET (Carbón en el Perú. Octubre 2000). Actualmente estas concesiones pertenecen a Lima Junefield Plaza S.A.C. cuya transferencia se hizo el 06 de diciembre del 2012. Carrascal, J.,

Matos, R., & otros. (2024). Análisis de la actividad minera en la Cuenca del Santa: Caso Mina Cocabal. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

El principal inconveniente que enfrenta la Mina Cocabal S.A.C. es que, desde el enfoque estructural, en la zona se presenta fallas y pliegues geológicas, lo que interrumpe la continuidad de los mantos y obliga a dividir el yacimiento en sectores o bloques, delimitados por la presencia de dichas fallas. Desde una perspectiva geomecánica, se identifican dos aspectos relevantes: el primero está relacionado con la existencia de numerosas cavidades vacías remanentes de procesos extractivos anteriores; y el segundo, con la ausencia de un programa geomecánico formal que respalde la planificación, el desarrollo y las actividades operativas.

La finalidad de la investigación es mejorar los sistemas de sostenimiento ahora empleados en las excavaciones subterráneas de la mina Cocabal, también conocida como “Vizcaya” o “Cocabal”. Los métodos de sostenimiento en uso incluyen estructuras de madera, arcos metálicos y pernos Split set en combinación con malla metálica. Según los responsables del trabajo han detectado una fuerte dependencia de en la utilización de madera así como elemento de soporte, así como periodos prolongados en la instalación de estos sistemas, lo que genera un incremento significativo en los costos operativos asociados al sostenimiento.

De este modo, a través del análisis del esbozo de los componentes o sistemas de sostenimiento, identificando las principales manifestaciones de pérdida de estabilidad y los mecanismos mediante los cuales estas se originan tales como el estado de esfuerzos, la presencia de bloques, entre otros que pueden ser comprendidos a partir de los aportes brindados por el análisis geomecánico, especialmente en la selección del diseño de soporte en los frentes de explotación. Esta evaluación técnica permite identificar las características mecánicas de los elementos geológicos que constituyen el cuerpo rocoso, facilitando el desarrollo de metodologías orientadas a anticipar y controlar el comportamiento de dichas estructuras rocosas. Todo ello contribuye al trabajo de la gestión operativa y de su equipo, con el propósito de asegurar la estabilidad de las labores en minería subterránea.

Del mismo modo, la relevancia de esta investigación sobre la evaluación geomecánica se vincula con la disminución en la cantidad y frecuencia de desprendimientos de roca, lo que contribuye a reducir posibles daños tanto a los equipos como al personal. Asimismo, la geomecánica influye positivamente en una mayor recuperación del mineral gracias a un diseño estructural adecuado, mejora la rentabilidad al evitar interrupciones en la producción que frecuentemente ocasionadas por problemas de estabilidad, y permite una disminución en los costos asociados a la rehabilitación de zonas inestables, entre otros beneficios.

En consecuencia, esta investigación se centra en una evaluación geotécnica orientada a estabilidad de las labores bajo tierra en la mina Cocabal, ubicada en Áncash, identificando la inestabilidad como una problemática crítica que requiere ser atendida mediante acciones correctivas aplicables a los taludes. Esta necesidad surge por los impactos acumulados de la actividad minera a lo largo del tiempo, tales como riesgos a la integridad física y salud del personal, originados por una planificación y análisis técnico inadecuados, condiciones operativas deficientes y el incumplimiento de los planes de cierre, lo que puede derivar en daños severos e irreversibles a las labores mineras.

Bajo este marco, la presente investigación fue desarrollada planteando el siguiente problema: ¿En qué medida la evaluación geomecánica determinará la estabilidad de labores mineras subterráneas de la Minera Cocabal Ancash 2019?

En el presente estudio se demuestra, que con la intervención de la Geomecánica, es posible identificar la forma más adecuada del sostenimiento en la minera Cocabal, y a partir de los resultados obtenidos sobre los factores que provocan desequilibrios como (el desprendimiento de rocas, deformaciones de los sostenimientos, desplazamientos de la roca encajonante y cambio en los estados tensionales), optimizar la estabilidad de las labores subterráneas, las cuales continúan viéndose afectadas por problemas persistentes.

Por ello; la investigación tendrá relevancia, pues, brindará aportes a la sociedad, dando a saber la respuesta geomecánica con los elementos a evaluar; ocasionándose en la galería zonas de riesgo potencial e inseguridad, para los que trabajadores, visitantes y estudiantes que visualizan esta obra subterránea; por lo que será de utilidad a las mineras, puesto que se plantearán medidas y controles frente a inestabilidades, que permitan evitar accidentes, pérdidas económicas y humanas; así como, prevenir los costos financieros generados por los desprendimientos de roca, lo que representaría una ventaja económica para la empresa, haciéndolo rentable y justificable.

La presente investigación se realizó con la presencia de los trabajadores de la Compañía Minera Buenaventura, Unidad Tambomayo, con el objetivo de definir la influencia de la implementación del sistema de riesgos mediante observaciones comportamentales en la reducción de accidentes laborales. Se empleó una metodología de tipo aplicada, basada en conocimientos existentes, con un punto de vista explicativo y un diseño no experimental, al no manipular directamente las variables de estudio. La muestra estuvo conformada por 50 colaboradores, a quienes se les aplicó una encuesta sobre el sistema de riesgos y se realizó una evaluación documentaria de la estadística de accidentes laborales. Los resultados evidenciaron que la implementación del sistema de riesgos a través de observaciones comportamentales tuvo un impacto significativo en la disminución de accidentes en la Unidad Tambomayo. La prueba de Wilcoxon arrojó un valor Z de - 3.059 y una significancia asintótica bilateral de 0.002, confirmando la efectividad del sistema. Antes de su implementación, en 2021, los

índices de accidentabilidad alcanzaban niveles críticos, con valores de 34.29 en junio y 17.59 en febrero. Sin embargo, en 2022, tras la implementación, estos índices disminuyeron significativamente, sin superar 4.63, lo que refleja una mejora en la seguridad laboral. El estudio también destacó el papel clave de la presencia de conocimientos, disponibilidad de recursos y una actitud adecuada por parte de los trabajadores en la mitigación de accidentes. Los datos obtenidos en la encuesta demostraron que estos factores mejoraron en 2022, lo que contribuyó directamente a la disminución de los accidentes laborales. En este sentido, la tasa de accidentabilidad se redujo del 64.29 % en 2021 al 35.71 % en 2022, consolidando la importancia del sistema implementado en la mejora de la seguridad en la unidad minera. Ortega Segura, L. J. (2025).

A más de una década del hecho, en 2025, este caso sigue siendo un recordatorio crucial sobre la importancia de la estabilidad geomecánica y los protocolos de seguridad en operaciones mineras subterráneas.

El diseño de taludes continúa siendo un aspecto crucial en numerosos proyectos de infraestructura. Este diseño debe considerar variables como los materiales naturales presentes, así como los parámetros geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos del sitio. Las fallas o deslizamientos en taludes pueden tener consecuencias catastróficas, tanto en términos económicos como humanos. Por ello, las intervenciones correctivas para estabilizarlos implican elevados costos y una planificación rigurosa. González et al (2025).

Según National Geographic (2025), hace unos 200 años se empezó a hacer minería en Nueva Gales del Sur. Esta actividad provocó cambios en las fuerzas internas de la Tierra, lo que, con el tiempo, causó un terremoto de 5.6 grados en 1989. Este sismo afectó gravemente al país, provocando la muerte de 13 personas, 160 heridos. De todas las personas afectadas, el 2% eran trabajadores de minas que estaban activas en ese momento. Esto reveló que las estructuras y construcciones de esas minas no estaban preparadas para enfrentar este tipo de desastres, por lo tanto, una de las dificultades más relevantes fue la caída de rocas dentro de las minas.

Albarracín et al (2025), según el análisis técnico y evaluación del terreno rocoso de la sierra (Sogamoso, Boyacá, Colombia) señalan que los datos recogidos en el lugar y con ayuda del programa Dips, se identificaron dos grupos de fracturas en la roca. Estas se muestran en los gráficos de puntos, de cantidad y de dirección (roseta). Además, usando metodología RMR, Q y el índice RQD, se concluyó que el estado del macizo rocoso es generalmente baja o deficiente.

Sumiri (2025), en su investigación sobre la aplicación de la geomecánica para evitar desprendimientos de roca en el método extracción escalonada con relleno, desarrollada

en la “Unidad Económica Administrativa Poracota de la Compañía de Minas Buenaventura y presentada en la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano”, concluye que las condiciones estructurales de la roca influyen bastante en cuánto tiempo puede mantenerse firme por sí sola y la clase de soporte necesario para la operación subterránea, en la etapa de producción. Los resultados fueron positivos al usar colores para clasificar la calidad de la roca (con categorías A, B, C y D), lo cual facilita la comprensión y uso de la guía geomecánica para decidir si se aplica un tipo de soporte activo o pasivo.

Maday (2025), “El Departamento de Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico”, en su estudio sobre las características del cuerpo rocoso en labores bajo la superficie de la región oriental del país, indica que en los resultados se evidencian la presencia de grietas en gran parte de los macizos rocosos. Esta situación está estrechamente relacionada con la pérdida de su estabilidad y con la forma en que la presión incide sobre ellos.

Como resultado del análisis de la estabilidad de las formaciones rocosas, considerando su resistencia y calidad, se determinó que en su mayoría presentan una condición media o regular. No obstante, en ciertos sectores y labores subterráneas se detectaron rocas deterioradas. Esta situación no solo obedece a fallas estructurales, sino también al efecto del agua, la erosión y las condiciones propias del entorno subterráneo. En base a ello, se definieron diversos criterios estructurales y geomecánicos aplicables al diseño de túneles y otras excavaciones subterráneas.

López (2025), En el estudio titulado “Selección del sistema de estabilización del nivel 4400 mediante la caracterización de la masa rocosa en el proyecto Atalaya Compañía Minera Santa Luisa S. A. Huaraz”, concluyó que las propiedades de la roca se analizaron según los tipos de material presentes. Usando el sistema RMR, se obtuvieron valores promedio para cada tipo de roca, siendo estos: 65.57 para calizas, 52.60 para skarn, 49.57 para lutita y 117.52 para arenisca. Asimismo, se indicó que la galería posee un (azimut) de 125° y dentro del sector compuesto por calizas presenta una extensión de 180 metros. En el tramo de skarn, se identificaron fracturas (discontinuidades) que tienen una orientación entre regular y favorable respecto a la dirección de la galería.

También se encontró una relación entre los valores RMR y Q, que se expresa con la fórmula: $RMR = 4.494 \times \ln(Q) + 47.6$, con un nivel de correlación alto (0.89 según el coeficiente de Pearson). Asimismo, el análisis numérico realizado mostró que el factor de seguridad promedio actual es de 1.04, lo que indica una posible afectación en el equilibrio del cuerpo rocoso en caso de no implementarse mejoras en el sistema de sostenimiento y refuerzo dentro de la excavación.

Córdova (2025) En su investigación titulada “Geomecánica en el minado subterráneo: caso mina Condestable”, el autor concluye que la geomecánica ha sido incorporada como una herramienta tecnológica clave dentro de la ingeniería de minas moderna, ya que contribuye significativamente a mejorar tanto la seguridad como la eficacia en los procesos subterráneos. Para que las actividades Ingeniería geotécnica desarrolladas en minas subterráneas sean efectivas, es fundamental que se realicen en un entorno organizacional adecuado, que facilite la integración de conocimientos técnicos, datos y análisis por parte del personal vinculado con las labores de extracción. Asimismo, se resalta que un programa geotécnico eficiente puede orientarse al diseño de esquema de desarrollo minero coherente, así como a la definición de diversos parámetros geotécnicos, involucrados en el proceso de explotación. Dicho programa debe contemplar aspectos esenciales como las características del entorno geológico, la elaboración del diseño de mina, el desarrollo de análisis de diseño, el monitoreo del comportamiento del macizo rocoso y los análisis posteriores. En este contexto, cobra especial relevancia la preparación de información geomecánica básica que sirva de sustento para los estudios de diseño. En el sector clasificado como (Prioridad 1 de la Mina Condestable 2) se ha podido aplicar de forma práctica varios conceptos técnicos, con el objetivo de proponer alternativas adecuadas para controlar la estabilidad de los espacios vacíos (cavidades), sobre todo de aquellos más grandes que quedaron tras trabajos de explotación anteriores. Además, se busca recuperar la mayor cantidad posible del mineral que aún queda en esta zona.

En esta área, se encuentran principalmente rocas de origen volcánico y sedimentario, como rocas tobáceas, coladas andesíticas, aglomerados y brechas volcánicas. Estas rocas están atravesadas por otras de origen intrusivo, que incluyen diques originados por intrusiones porfídicas intermedias. La mayor parte del mineral se encuentra en materiales volcánicos finos y brechas, en forma de estructuras mineralizadas, con pequeñas concentraciones dentro de las distintas unidades de roca.

López (2025) señala que la geomecánica, como disciplina científica, comenzó a aplicarse a finales de la década de 1950 en el entonces complicado ámbito de las construcciones subterráneas. Se tiene conocimiento de que el “Congreso inaugural de Mecánica de Rocas” fue realizado en Portugal en 1966.

González (2025) señala que, además de su aplicación en obras subterráneas, la geomecánica también tiene un papel relevante en el análisis de taludes y cimentaciones. Aunque las clasificaciones geomecánicas existen desde hace más de cinco décadas, su difusión a nivel internacional se intensificó a partir de los años 70.

Palmstrom (2025) menciona que la geomecánica es una rama de la ingeniería geotécnica que estudia la conducta del macizo rocoso y desde este estudio, estimar las condiciones geotécnicas de diseño y el sistema de soporte requerido para un túnel.

Según Castro (2025), La ocurrencia de caídas de rocas puede deberse tanto a procesos

naturales como a intervenciones humanas derivadas de actividades de ingeniería, representando uno de los desafíos más importantes en explotaciones mineras a cielo abierto. Para abordar la inestabilidad de los taludes, el estudio se sustentó en un análisis geotécnico del terreno mediante técnicas y herramientas que permiten establecer acciones preventivas o correctivas orientadas a reducir o eliminar los riesgos de accidentes. La investigación se centró en un talud con variaciones constantes, condicionadas por su génesis y propiedades, así como por factores como movimientos intensos, morfología del terreno y características geológicas y del suelo.

Desde tiempos antiguos, la minería ha constituido una actividad esencial para el progreso económico y tecnológico de la sociedad. La mayoría de los objetos que utilizamos se originan a partir de la transformación de recursos naturales, siendo los minerales elementos clave en dicho proceso. Se puede decir que el uso de la minería ha sido fundamental para el crecimiento industrial de las sociedades. El trabajo en una mina subterránea, que se realiza dentro de una formación rocosa y a gran profundidad, necesita una infraestructura especial. Esta suele incluir: un pozo de entrada, niveles o plantas de trabajo, túneles, conexiones entre niveles y áreas de extracción, formando un sistema completo que permita establecer un circuito básico de ventilación. Estas construcciones deben tener el tamaño adecuado para que las personas y las máquinas puedan moverse de forma segura.

Cada mina es distinta en cuanto a su ubicación, estructuras y forma de operar. Estas diferencias se deben, principalmente, a las características del terreno donde se encuentra, la manera en que se accede a ella (como un pozo vertical o una rampa), la variedad de mineral que se extrae y el método de explotación que se usa. Las minas subterráneas se dividen en varios tipos de trabajos. Por un lado, está la infraestructura principal para el acceso y los servicios, que incluye el pozo principal, la rampa que conecta los distintos niveles, los túneles de trabajo y transporte, las zonas donde se carga el mineral y los pozos que permiten la ventilación. Estas construcciones suelen durar muchos años y se hacen en zonas sin valor mineral. Por otro lado, están los trabajos auxiliares, como los que sirven para exploración, comunicación interna y otras instalaciones adicionales, incluyendo las chimeneas por donde pasa el mineral. Finalmente, están las zonas donde realmente se extrae el mineral, conocidas como frentes de explotación. Estas áreas tienen una forma determinada según la capa o el cuerpo del mineral, y su tiempo de uso depende de cuánto tiempo dure la actividad de extracción. (Ministerio de Industria y Energía, 2025).

Por otro lado, el sostenimiento en la minería subterránea se entiende como el uso de métodos y materiales que tienen como objetivo reforzar y asegurar la estabilidad de las rocas que rodean las excavaciones (Carhuamaca, 2025).

Los trabajos de sostenimiento en minería suelen ser costosos y pueden disminuir el ritmo de trabajo o producción. Sin embargo, son indispensables para proteger al personal y evitar accidentes graves. Además, uno de sus principales objetivos es

“Evaluación Geomecánica para mejorar la estabilidad de las labores mineras subterráneas en La Mina Cocabal-Ancash – 2019”
conocer la fuerza o resistencia de la roca, para que se mantenga estable y no se derrumbe (Quispe, M., 2025).

En términos generales, el “sostenimiento” se relaciona con varios métodos y materiales usados para mantener estable la roca en la minería subterránea. Este concepto abarca una variedad de elementos como pernos de anclaje (incluyendo anclajes mecánicos, varillas metálicas, barras helicoidales fijadas con resina o cemento, swellex, split sets y hydrabolts, cables, mallas metálicas, cintas de acero, straps, shotcrete), tanto en su forma simple como reforzado con fibras metálicas, estructuras de soporte en acero, gatos hidráulicos, elementos de madera (como marcos y puntales), además del uso de relleno, entre otros sistemas. Se considera que todos estos elementos tienen un papel muy importante para disminuir los riesgos de inestabilidad y mantener firme la roca alrededor de los túneles y espacios subterráneos. Martínez (2025).

Debido a la naturaleza del trabajo en minería subterránea, las actividades se realizan dentro de la mina y en espacios vacíos, donde con frecuencia hay inestabilidad por las fracturas en la roca o en el mineral extraído. Por eso, es importante redistribuir las fuerzas para lograr que el área sea estable y segura para trabajar. Esto hace necesario aplicar trabajos de sostenimiento, los cuales se sujetan a una serie de condiciones como la clase de roca, fallas en los rellenos o grietas abiertas (Quilca, H., 2025).

Según Maday (2025), la geomecánica es una ciencia, tanto teórica como práctica, que estudia cómo se comportan las rocas y las fuerzas que se generan cuando se hace una excavación subterránea. Su finalidad es ofrecer mejores soluciones al problema del sostenimiento en los trabajos mineros. Entre sus principales objetivos están: mejorar la estabilidad del terreno para proteger a las personas y a los equipos que trabajan bajo tierra; asegurar que las excavaciones cumplan con el propósito para el que fueron hechas; y brindar apoyo técnico a las áreas de planificación, geología y operación de la mina.

Según Cook (2025), la evaluación geomecánica consiste en analizar las reacciones de los suelos y las rocas, también llamados materiales geológico cuando están sometidos a cambios en la presión, el esfuerzo, la temperatura u otras condiciones del entorno. Es decir, analiza cómo estos materiales se deforman e incluso pueden romperse. La geomecánica es una ciencia relativamente nueva que sigue creciendo. En la industria petrolera, este campo se centra principalmente en el estudio de las rocas, aunque a veces es difícil distinguir entre tipos de rocas, ya que las no consolidadas también pueden comportarse como sólidos.

El sostenimiento en la minería subterránea se entiende como el uso organizado de métodos y materiales para reforzar y mantener la estabilidad de las rocas que rodean las excavaciones. (Cook, N., 2025).

La finalidad de esta investigación fue determinar en qué medida la evaluación geomecánica ayuda a optimizar la estabilidad de los trabajos subterráneos en la Mina de Cocabal – Ancash, en el año 2019. De igual forma, entre los objetivos específicos se planteó: identificar las características geológicas de la roca sólida en las labores subterráneas y analizar las evaluaciones geomecánicas realizadas en dichas áreas, lo cual contribuirá al cumplimiento del objetivo general.

Por otro lado, se plantearon las siguientes hipótesis: Hipótesis nula (H0) Si no se lleva a cabo una evaluación geomecánica, entonces no se conseguirá la estabilidad de los trabajos subterráneos en la mina Cocabal – Ancash 2019. Hipótesis alternativa (H1) La aplicación de una adecuada evaluación geomecánica influye favorablemente en la optimización de la estabilidad de las labores subterráneas en la mina Cocabal – Ancash 2019.

Frente a esta situación, este trabajo tiene como propósito destacar la importancia de las evaluaciones geomecánicas como una herramienta clave para optimizar la firmeza de las obras subterráneas y disminuir los riesgos durante las operaciones en la minería.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

1. Fundamentos de la Geomecánica en Minería Subterránea

La geomecánica es una disciplina fundamental en la ingeniería de minas, encargada del estudio del comportamiento mecánico de los macizos rocosos y de su respuesta ante diferentes tipos de excavaciones. En el contexto de la minería subterránea, su aplicación resulta esencial para garantizar la estabilidad de las labores y la seguridad del personal que opera en el subsuelo.

Esta ciencia permite evaluar las condiciones geológicas y geotécnicas del entorno minero, contribuyendo al diseño adecuado de sostenimientos, al control de deformaciones y al manejo de riesgos asociados a la excavación de túneles, cámaras y galerías. Como señala Córdova Rojas (2025), la geomecánica se ha consolidado como una herramienta tecnológica clave dentro de la industria minera, facilitando el diseño, planeamiento y operación de minas con altos estándares de seguridad y eficiencia.

Su integración en los procesos operativos ha permitido mejorar el entendimiento del comportamiento del terreno, optimizando la toma de decisiones en todas las etapas del ciclo minero, desde la exploración hasta el cierre de mina.

2. Métodos Geomecánicos del Cuerpo Rocosos

Para evaluar la calidad de la estructura rocosa, se emplean diversas categorizaciones geomecánicas:

RMR (Clasificación del Cuerpo Rocosos): Creado por Bieniawski, este método toma en cuenta varios factores como la firmeza de la roca sin

fracturas, el RQD, la distancia entre las fracturas y su estado, la presencia de corriente hídrica subterránea y la orientación de las fracturas con respecto a las excavaciones.

- **Q de Barton:** Este índice permite valorar el estado del macizo rocoso considerando factores como el RQD, la rugosidad y alteración de las Fisuras, así como la corriente hídrica y el esfuerzo en la estructura rocosa.
- **GSI (Geological Strength Index):** Propuesto por Hoek y Brown, este sistema se fundamenta en la configuración de la estructura rocosa y en las interfaces de sus grietas, ofreciendo una estimación de su resistencia y capacidad de deformación.

Estas clasificaciones permiten determinar la condición del macizo y diseñar el sostenimiento adecuado.

3. Métodos de Evaluación Geomecánica

La evaluación geomecánica combina métodos empíricos, analíticos y numéricos:

Mapeo Geomecánico: se refiere al levantamiento de información en campo relacionada con las propiedades del cuerpo rocoso, incluyendo la ubicación, separación y estado de las grietas.

Ensayos de Laboratorio: facilitan la obtención de las características físicas y mecánicas de las rocas, tales como su soporte a la compresión y su capacidad de deformación.

Análisis Numérico: Utiliza software especializado (por ejemplo, Phase2, Unwedge, Dips) para modelar el comportamiento de la formación rocosa y analizar la estabilidad de las excavaciones.

Estos métodos proporcionan una comprensión integral del comportamiento de la formación rocosa y son fundamentales para el esquema del sostenimiento.

4. Diseño de Sostenimiento en Labores Subterráneas

El diseño del sistema de soporte se basa en la condición del macizo rocoso y las condiciones geomecánicas identificadas. Según Cortez Huamán y Cotrina Huamán (2022), en la mina Atahualpa se aplicaron las clasificaciones RMR, Q y GSI para identificar la calidad de roca y diseñar sistemas de sostenimiento adecuados, como el empernado sistemático con malla electrosoldada en zonas de roca de mala calidad.

El sostenimiento puede incluir pernos, mallas, shotcrete y otros elementos que contribuyen a la estabilidad de las labores mineras. Varios trabajos de investigación han evidenciado la relevancia que tiene la evaluación geomecánica en las operaciones mineras en el Perú.

Mina Maribel de Oro A – Phoquera: Valeriano Zuni (2019) realizó una evaluación geomecánica para minimizar la caída de rocas, utilizando métodos empíricos, estereográficos y numéricos para caracterizar el macizo rocoso y diseñar sistemas de sostenimiento adecuados.

Mina Parcoy: Montenegro Santibañez (2019) Se analizó el impacto de la geomecánica en el soporte de las labores mineras, concluyendo que la condición del macizo rocoso variaba de deficiente a aceptable, y se recomendó un sistema de sostenimiento basado en shotcrete y pernos Hydrabolt.

Estos casos resaltan la relevancia de la geomecánica en la mejora de la estabilidad y seguridad en las operaciones mineras subterráneas.

5. Conclusiones

El marco teórico establece que la aplicación de la geomecánica en la minería subterránea es esencial para preservar la integridad de las excavaciones y la seguridad del trabajador. La utilización de clasificaciones geomecánicas, métodos de evaluación y diseño de sostenimiento adecuados permite identificar y mitigar riesgos asociados a la inestabilidad del macizo rocoso. Los estudios de

“Evaluación Geomecánica para mejorar la estabilidad de las labores mineras subterráneas en La Mina Cocabal-Ancash – 2019”
casos en minas peruanas corroboran la efectividad de estas prácticas en la mejora de las condiciones operativas.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

1. Objetivo General

El objetivo principal de la tesis fue evaluar las características geomecánicas del cuerpo rocoso en la Mina Cocabal, ubicada en Áncash, Perú, con el fin de diseñar e implementar sistemas de sostenimiento adecuados que mejoren la estabilidad de las excavaciones mineras subterráneas y reduzcan los riesgos asociados a la inestabilidad del terreno.

2.- Metodología Aplicada

La investigación se desarrolló en varias etapas, combinando trabajos de campo, laboratorio y gabinete:

- **Recolección de Datos en Campo:** Se realizó a cabo un levantamiento geomecánico detallado en las labores subterráneas, identificando aspectos como la dirección, distancia entre fracturas y el estado en que se encuentran, además de registrar la presencia de agua y posibles señales de deterioro en la roca.
- **Ensayos de Laboratorio:** Se examinaron muestras de roca con el propósito de identificar sus características físicas y mecánicas, tales como la resistencia a la compresión simple y la densidad, lo que permitió establecer la condición de la masa rocosa.
- **Aplicación de Clasificaciones Geomecánicas:** Se emplearon métodos como el RMR (Rock Mass Rating), el sistema Q de Barton y el GSI (Geological Strength Index) para analizar la condición de la estructura rocosa y delimitar áreas con distintos grados de estabilidad.
- **Análisis Estructural:** Se emplearon herramientas como el (software Dips) para analizar la orientación de las hendiduras y evaluar posibles mecanismos de falla, como deslizamientos planos o en cuña.
- **Modelamiento Numérico:** Se utilizó software especializado, como Phase2 y Unwedge, para simular el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones de carga y diseñar sistemas de sostenimiento efectivos.

3. Resultados Obtenidos

La evaluación geomecánica reveló variaciones en la calidad de la masa rocosa a lo largo de las labores subterráneas:

- **Área de Roca de Calidad Mala:** Identificadas en sectores donde las discontinuidades eran frecuentes y la resistencia de la roca era baja, requiriendo sistemas de sostenimiento robustos.
- **Área de Roca de Calidad Regular a Buena:** En estas áreas, la estabilidad era mayor, permitiendo la implementación de sistemas de sostenimiento más ligeros o incluso la posibilidad de excavaciones sin soporte adicional, dependiendo de las condiciones específicas.

El análisis estructural permitió identificar orientaciones críticas de las discontinuidades que podrían comprometer la estabilidad, mientras que el modelamiento numérico ayudó a predecir zonas de concentración de esfuerzos y deformaciones.

4. Propuestas de Sostenimiento

Basándose en los resultados obtenidos, se propusieron diferentes sistemas de sostenimiento adaptados a las condiciones geomecánicas de cada zona:

- **Para Zonas de Roca de Calidad Mala:** Se recomendó el uso de pernos de anclaje sistemáticos combinados con malla electrosoldada y aplicación de shotcrete para proporcionar soporte inmediato y prevenir desprendimientos.
- **Para Zonas de Roca de Calidad Regular:** Se sugirió un sostenimiento selectivo, utilizando pernos en puntos críticos y malla en áreas con evidencia de fracturamiento.
- **Para Zonas de Roca de Calidad Buena:** Se consideró la posibilidad de excavaciones sin sostenimiento, siempre que se mantuviera un monitoreo constante para identificar posibles variaciones en el comportamiento del macizo rocoso.

5. Conclusiones y Recomendaciones

La tesis concluyó que la aplicación de una evaluación geomecánica detallada es fundamental para diseñar sistemas de sostenimiento adecuados, fortalecer el equilibrio de las excavaciones subterráneas y garantizar la seguridad del trabajador. Además, se sugirió establecer un programa permanente de monitoreo geomecánico, junto con la formación del personal en métodos para reconocer y reducir riesgos geotécnicos.

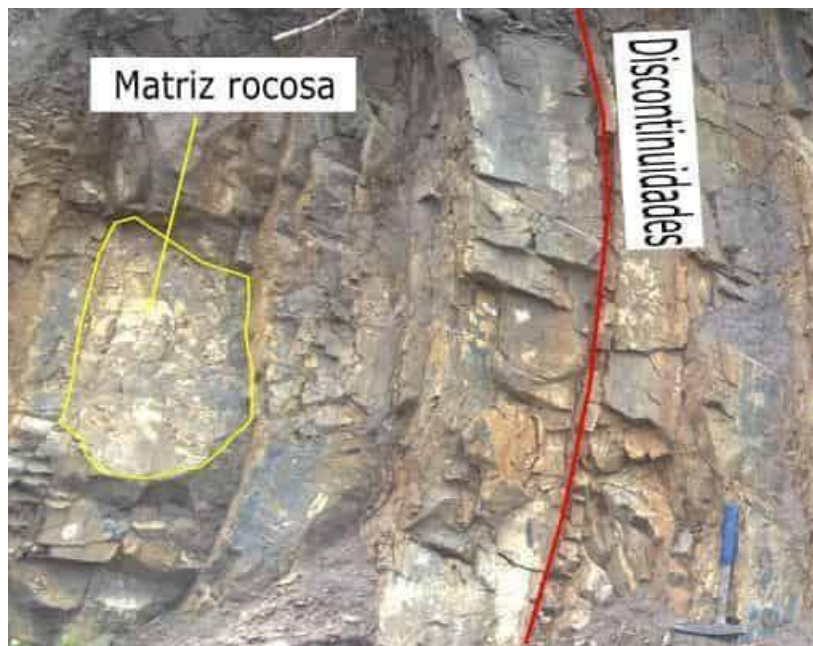
CAPITULO IV RESULTADO

4.1 Determinar las características geológicas de la roca maciza en las labores mineras subterráneas.

Las rocas sólidas se originan de forma natural en lugares donde existen fracturas o zonas débiles que dividen la masa de roca en bloques. Estas divisiones forman lo que se conoce como un conjunto rocoso o macizo rocoso. Tal como se visualiza en la figura 1 la geometría del entorno rocoso.

Figura 1

Formas de la matriz intacta



Nota: En la figura se muestran el conjunto rocoso, la masa de roca y las fracturas presentes. Tomado de (Geologiaweb, 2021)

Dentro de las características principales de la roca maciza tenemos: la discontinuidad, anisotropía y heterogeneidad. Aquí lo describimos a cada una de ellas.

Discontinuidad, superficies geológicas que mantienen fallas y cambian la continuidad de los diferentes atributos mecánicos de las piedras rocosas, otorgándoles comportamiento geomecánico discontinuo. Dentro de la discontinuidad se disgrega en tipos tales como:

Diaclasas, representan el tipo de fractura más común, y suelen generarse por procesos tectónicos, el enfriamiento de masas magmáticas y la disminución de la presión litostática.

Planos de estratificación, Las superficies de estrato están vinculadas al proceso mediante el cual los sedimentos se acumulan, y la separación entre ellas puede ir desde unos cuantos centímetros hasta varios metros.

Fallas geológicas, las fracturas tectónicas originadas por la actividad de las placas, alteran las estructuras rocosas y pueden generar desplazamientos entre bloques de roca sólida.

Esquistosidad, son discontinuidades que se forman por el incremento de tectonismo asociándose a las rocas metamórficas

La caracterización del conjunto rocoso brinda información sobre las propiedades geotécnicas de las rocas, lo que permite identificar el tipo de roca, su nivel de alteración y su resistencia. A continuación, se presentan las tablas 1 y 2, donde se muestra el grado de meteorización y la resistencia de las rocas sólidas.

Tabla 1

Grado de Meteorización de la Matriz Rocosa.

Término	Descripción
Fresca	No hay meteorización en la matriz rocosa.
Decolorada	Cambios en el color primigenio de la matriz rocosa.
Desintegrada	Alteración de la roca en suelo, puede estar en estado friable, aunque los minerales no se hayan descompuesto.
Descompuesta	Alteración de roca en suelo y minerales descompuestos.

Fuente: Adaptado de Córdova Rojas (2025).

En la tabla cada uno de los grados de meteorización en que se puede encontrar la masa rocosa.

Tabla 2

En la tabla se detalla la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) en megapascuales (MPa), según las clasificaciones propuestas por Córdova Rojas (2025).

Resistencia a compresión Simple (MPa)	Descripción
1-5	Muy blanda
5-25	Blanda
25-50	Moderadamente dura
50-100	Dura
100-250	Muy dura
>250	Extremadamente dura

Fuente: Adaptado Córdova Rojas (2025)

Otra manera de evaluar la dureza de la masa rocosa es utilizando el “martillo de geólogo” de la siguiente manera:

- Resistencia muy alta: se astilla con varios golpes y se producen chispas
- Resistencia alta: se astilla con 3 golpes
- Resistencia media: se rompe con 1 a 3 golpes
- Resistencia baja: superficialmente con un solo golpe
- Resistencia muy baja: profundamente con la punta del martillo

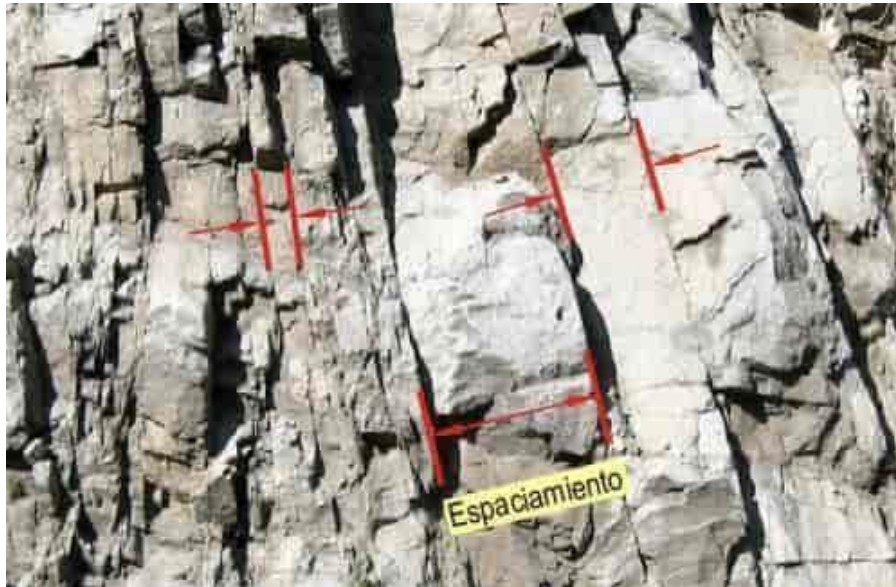
Por otra parte, la discontinuidad de la roca maciza se describe por su: orientación, espaciado, continuidad, rugosidad, resistencia, abertura, relleno y filtraciones. A continuación, se detalla brevemente cada una de ellas:

Orientación, define el rumbo y posición espacial de la superficie (juntas, diaclasas, fallas, estratificación, etc), tal como se muestra en figura 2.

El espaciado, es la distancia perpendicular entre dos fracturas cercanas. Cuando estas fracturas están más juntas, los bloques de roca quedan más separados, pero la masa de roca entre ellos se mantiene sin alteraciones. Esto se puede ver en la figura 2, y en la tabla 3 se presentan los valores del espaciado.

Figura 2

Orientación de la Discontinuidad



Nota: En la figura se visualiza el espaciamiento de discontinuidad de la roca. Tomado de (Geologiaweb, 2021)

Tabla 3

Separación de las grietas en la masa de roca.

Descripción	Espaciado
Extremadamente junto	<2 cm
Muy junto	2-6 cm
Junto	6-20 cm
Moderadamente junto	20-60 cm
Separado	60-200 cm
Muy separado	2-6 m
Extremadamente separado	>6 m

Fuente: Adaptado de Córdova Rojas (2025).

Persistencia, es el tamaño del área de una discontinuidad de la estructura rocosa, a menor persistencia la estabilidad es mayor y viceversa, a continuación, en la tabla 4 se detalla los datos de persistencia.

Tabla 4

Persistencia de las Discontinuidades de la Roca Maciza

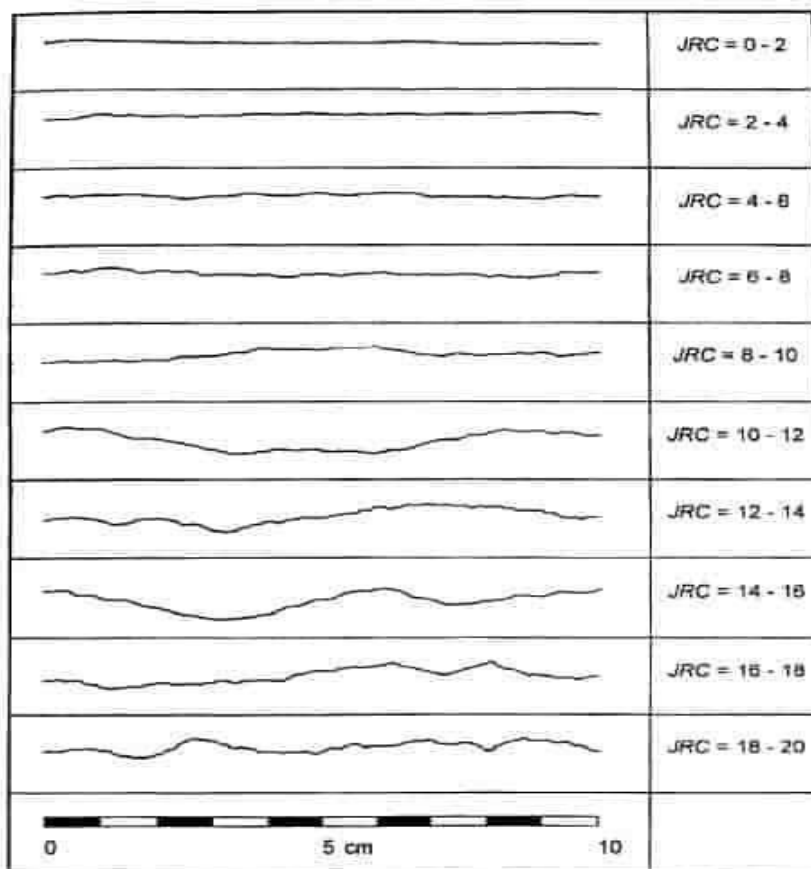
Persistencia	Longitud
Muy baja continuidad	<1 m
Baja continuidad	1 – 3 m
Continuidad media	3 -10 m
Alta continuidad	10 -20 m
Muy alta continuidad	> 20 m

Fuente: Adaptado de Córdova Rojas (2025).

Rugosidad, aspereza en la superficie de las discontinuidades, a menor rugosidad existe discontinuidad y el macizo rocoso es menor y viceversa, tal como se visualiza en la figura 3.

Figura 3

Rugosidad de la Discontinuidad



Nota: En la figura la rugosidad de la discontinuidad de la roca. Tomado de (Geologiaweb, 2021)

Abertura, separación entre dos superficies de una grieta en la roca, a menor abertura mayor estabilidad del macizo y viceversa, en la tabla 5 se precisa los valores de separación.

Tabla 5

Abertura de las Discontinuidades de la Roca Maciza

Abertura	Descripción
<0,1 mm	Muy cerrada
0,1-0,25 mm	Cerrada
0,25-0,5 mm	Parcialmenteabierta
0,5-2,5 mm	Abierta
2,5-10 mm	Moderadamente ancha
> 10mm	Ancha
1-10 cm	Muy ancha
10-100 cm	Extremadamente ancha
> 1m	Cavernosa

Fuente: Adaptado de Córdova Rojas (2025).

Relleno, espacio de las discontinuidades en el cual los materiales se alojan, cuando los materiales son suaves el macizo rocoso es menor y si los materiales son duros el macizo rocoso es mayor.

Anisotropía, presencia de discontinuidades generando debilidad en las rocas macizas y mantienen una orientación de estratificación, clivaje, foliación, laminación, entre otros, generando comportamientos mecánicos diferentes en la roca maciza

Heterogeneidad, se vincula con la diversidad de características físicas y mecánicas presentes en diferentes áreas de la estructura rocosa, lo que facilita la evaluación de variaciones estructurales y fracturas internas.

En ese sentido, luego de haber determinado las características geológicas a nivel general, se puede decir que la Mina Cocabal, en su zona de explotación mantiene discontinuidades en la matriz rocosa lo cual dificultades y riesgos inherentes a las mismas labores, pero a la vez estas pueden ser superadas teniendo en consideración los valores de cada una de las características descritas líneas arriba, para ello debe desarrollar las especificaciones técnicas correspondientes a los trabajos en la zona desprendiéndose esos datos de las características generales hacia lo particular que son las zonas de trabajo de la mina en estudio.

4.2 Decretar las características geomecánicas en las labores mineras subterráneas

Las características geomecánicas están influenciadas por las tensiones externas aplicadas sobre ellos, entre las cuales tenemos: elasticidad, plasticidad, maleabilidad, ductilidad, dureza, tenacidad y fragilidad, las cuales se describen brevemente a continuación:

Elasticidad, La elasticidad es la capacidad de un cuerpo para volver a su forma inicial una vez que se elimina la fuerza que lo deformó, como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Elasticidad



Nota: En la figura se visualiza la forma de elasticidad y el retorno a su estado normal. Tomado de (Universidad de la Punta, s/f).

Plasticidad, el material mantiene la nueva forma que adquiere al esfuerzo sometido, como se visualiza en la figura 5.

Figura 5

Plasticidad



Nota: En la figura de visualiza la forma de plasticidad. Tomado de (Universidad de la Punta, s/f)

Maleabilidad, el material se conforma en láminas delgadas y no se rompen, como se aprecia en la figura 6.

Figura 6

Maleabilidad



Nota: En la figura de visualiza la maleabilidad en láminas del aluminio. Tomado de (Universidad de la Punta, s/f)

Ductilidad, materiales que pueden ser estirados y se forman hilos, como se visualiza en la figura 7.

Figura 7

Ductilidad



Nota: En la figura se visualiza la ductilidad del cobre. Tomado de (Universidad de la Punta, s/f)

Dureza, es la fuerza que mantiene a ser penetrado por otro cuerpo extraño a pesar de desgaste de abrasivos, tal como se visualiza en la figura 8.

Figura 8

Dureza



Nota: En la figura se visualiza la dureza del diamante. Tomado de (Universidad de la Punta, s/f)

Por otra parte, para la dureza existen escalas de uso industrial que se detallan a continuación:

Dureza Brinell, emplea una esfera de acero al tungsteno para medir la dureza, aunque su exactitud disminuye al aplicarse en láminas metálicas con espesores inferiores a 6 milímetros.

Dureza Knoop, evalúa la dureza mediante un indentor de diamante que aplica una carga constante, proporcionando resultados en una escala fija y precisa.

Dureza Rockwell, emplea un cono de diamante como indentor, aunque en algunos casos también se utiliza una esfera de acero, según el tipo de material evaluado.

Rockwell superficial, se utiliza en elementos de reducido espesor, como hojas de afeitar o recubrimientos que han sido sometidos a procesos de endurecimiento en la superficie.

Dureza Rosiwal, determina la dureza absoluta de un material, evaluando su resistencia al desgaste por fricción, siguiendo como referencia el corindón con un dato estándar de 1000.

Dureza Shore, llevado a cabo comunes cleroscopio, proporciona resultados sin unidades físicas y cuenta con diversas escalas para adaptarse a distintos materiales.

Dureza Vickers, utiliza para la penetración un diamante en figura de pirámide cuadrangular, uso de elementos blandos, mejora al ensayo Brinell especialmente para dureza con (chapas de hasta 2 mm de espesor).

Dureza Webster, utiliza máquinas manuales y apto para pieza de manejo difíciles y los valores obtenidos suele cambiar a valores Rockwell.

Tenacidad, resistente a la rotura a pesar de someterse a esfuerzo de deformación, tal como se visualiza en la figura 9.

Figura 9

Tenacidad



Nota: En la figura se visualiza la tenacidad del acero. Tomado de (Universidad de la Punta, s/f)

Fragilidad, material que se rompe sin deformación elástica, tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Fragilidad



Nota: En la figura se visualiza la fragilidad del vidrio. Tomado de (Universidad de la Punta, s/f)

En base a la información indicada líneas arriba, se determina que en la mina en estudio se debe dar prioridad a la identificación del material rocoso y también del macizo rocoso, considerando que la zona tiene pendientes muy variables y tectonización frecuente del carbón, así como también intrusiones esporádicas de rocas eruptivas hipoabísicas. Entre las propiedades mecánicas observadas en el área de extracción se incluyen la separación entre fracturas, su continuidad, la textura de las superficies, el grado de apertura, el tipo de relleno, así como

“Evaluación Geomecánica para mejorar la estabilidad de las labores mineras subterráneas en La Mina Cocabal-Ancash – 2019”
procesos de intemperismo, alteraciones estructurales y presencia de humedad.

4.3 Evaluación geomecánica realizada en la minería subterránea.

Para realizar la evaluación geomecánica se pueden aplicar tres sistemas tales como:

4.3.1 (RQD) Rock Quality Designation

4.3.2 (RMR) Rock Mass Rating

4.3.3 (Q) Tunnel Quality Index

Seguidamente se describe cada uno de los sistemas:

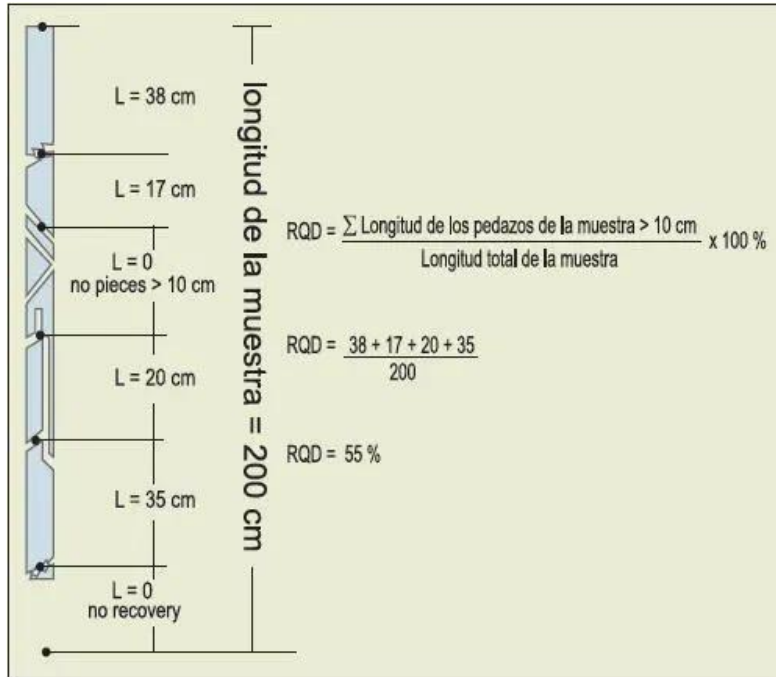
RQD – utilizado para clasificar el estado del macizo rocoso, sirve para evaluar su condición en una determinada área. Por ejemplo, al analizar testigos de perforación con dimensiones de (54,7 mm de diámetro y 1,5 metros de longitud), se obtiene un valor porcentual representativo como el siguiente:

Porcentaje	Interpretación Cualitativa
0 – 25 %	Muy Malo
25 – 50 %	Malo
50 – 75 %	Regular
75 – 90 %	Bueno
90 – 100 %	Muy Bueno

El valor de 10 cm = diámetro de la muestra x 2

Figura 11

Cálculo del RQD



Nota: En la figura se visualiza el procedimiento de medición y cálculo de RQD. Tomado de Instituto de Seguridad Minera – ISEM. (2025).

RMR : utilizado para calificar la estabilidad de túneles, considera factores como la densidad y estado de alteración, los esfuerzos observados en el estructura rocoso del área evaluada, así como el nivel de infiltración de agua.

Muy buena 81-100. Sin sostenimiento, Pernos puntuales $L = 1.4 + (0.18 \times W)$

Buena 61-80. Puntuales $L = 1.4 + (0.18 \times W)$

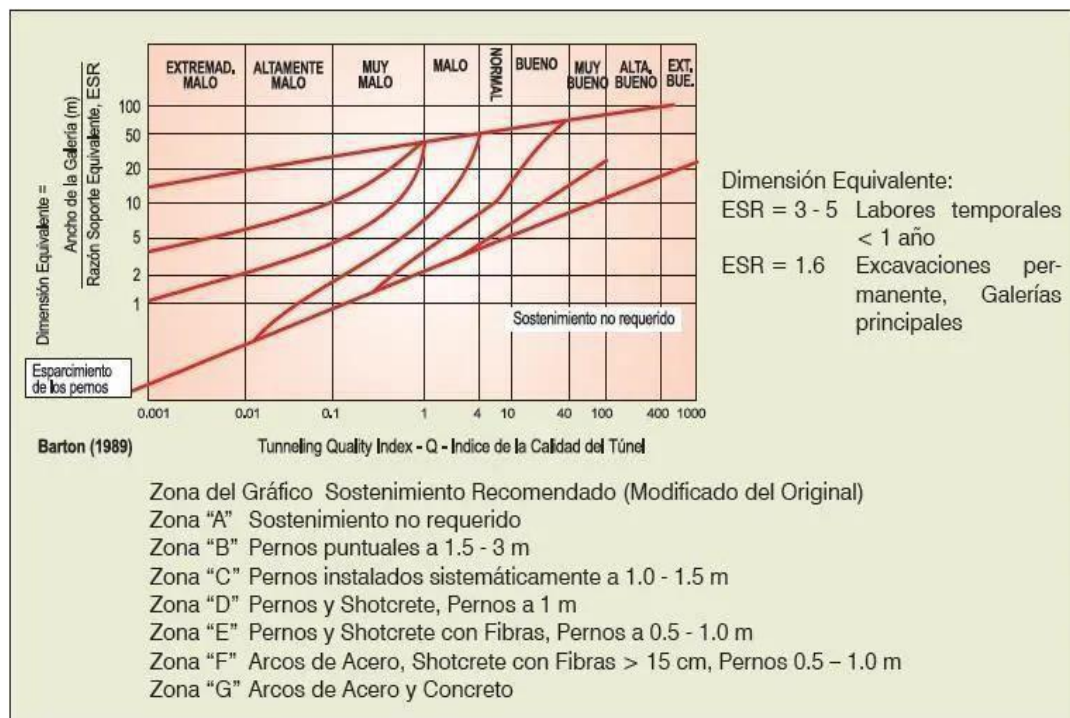
Normal 41-60. Pernos – Esp. 1.5, $L = 1.8 + (0.18 \times W)$, Shotcrete 50mm Malo

21-40. Shotcrete 100mm, Pernos – Esp. 1m, $L = 2 + (0.18 \times W)$

Muy malo < 20 Arcos. Shotcrete 150mm, Pernos– Esp. 1m, $L = 3 + (0.18 \times W)$

Figura 12

Descripción del RMR



Nota: En la figura se visualiza la descripción del RMR. Tomado de Instituto de Seguridad Minera – ISEM. (2025).

Q Index, considera en su estimación parámetros como la firmeza del macizo, el RQD, las discontinuidades, el contenido de humedad y las tensiones en el entorno. Además, el valor ESR (Relación de Sostenimiento de la Excavación) se relaciona directamente con el propósito del túnel y su tiempo de servicio proyectado.

Teniendo en cuentas los sistemas identificados la Mina Cocabal debe considerar determinar los valores apropiados para la explotación in situ, tomando en cuenta que las zonas de explotación mantienen estructuras macizas rocosas con discontinuidades, asimismo presenta heterogeneidades y propiedades variables. Es en ese sentido la empresa al aplicar la geomecánica, beneficia a las diversas áreas operativas en los aspectos que se detallan a continuación:

- Asegurar la protección en los trabajos de excavación minera mediante el estudio de los movimientos del terreno, la presión y otros factores que afectan la estabilidad.
- Determinar el tamaño máximo de las aberturas y el tiempo que las excavaciones mineras, tanto actuales como futuras, pueden mantenerse estables por sí solas.
- Evaluar la estabilidad de las labores de preparación y explotación, revisando en cada una si se forman bloques o cuñas que puedan desprenderse.
- Ayudará a identificar las direcciones más adecuadas para realizar las labores de preparación y desarrollo que se van a ejecutar.
- Servirá para establecer el orden de explotación, tanto en zonas específicas como en todo el yacimiento.
- Ayudará a unificar el tipo y la cantidad de soporte que se debe usar en cada labor minera, así como el tipo de relleno que se debe aplicar.
- Facilitará la elección y el diseño de nuevas opciones para explotar las zonas futuras, así como proponer algunas modificaciones al método de explotación que se usa actualmente.
- A través del monitoreo geomecánico, ayudará a comprobar y confirmar las suposiciones hechas durante las etapas iniciales del diseño del trabajo minero

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1.- Se determinó que se descarta la hipótesis nula (H_0): *"Si no se realiza una evaluación geomecánica, entonces no se logrará la estabilidad de las labores subterráneas en la mina Cocabal – Ancash, 2019"*, y se admite la hipótesis alterna (H_1): *"Si se realiza una evaluación geomecánica, entonces se logrará la estabilidad de las labores subterráneas en la mina Cocabal – Ancash, 2019"*. Esta conclusión se sustenta en la premisa de que una evaluación geomecánica adecuada, basada en parámetros técnicos precisos, es fundamental para garantizar la estabilidad estructural y operativa de las excavaciones subterráneas en la mina en estudio.
- 2.- Se identificaron las características del conjunto rocoso, destacando la presencia de fracturas, la variación en sus propiedades y su composición no uniforme. Las fracturas se estudian mediante varios aspectos, como la dirección, la separación entre ellas, su continuidad, la textura de las superficies, la resistencia al deslizamiento, el tamaño de la abertura, el tipo de material que las rellena y si hay filtraciones de agua. Cada uno de estos elementos tiene valores que se pueden medir, lo que nos ayuda a estudiar con precisión el nivel de fracturamiento del conjunto rocoso.
- 3.- Se identificaron las principales propiedades del conjunto rocoso, incluyendo características como su capacidad para deformarse, su dureza, resistencia a romperse y facilidad para cambiar de forma. Además, en la zona de trabajo de la mina analizada, se observaron otras propiedades importantes, como la distancia entre las fracturas, su extensión, la textura de sus superficies, el tamaño de las aberturas, la clase de material que las rellena, el nivel de desgaste por el clima, los cambios en la roca y la presencia de agua. Todos estos factores son clave para entender cómo se comporta la roca y cómo afectan la estabilidad de las excavaciones subterráneas.
- 4.- Las evaluaciones geomecánicas en minería se realizan mediante la aplicación de tres sistemas ampliamente reconocidos como: Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR) y Tunnel Quality Index (Q). La implementación de estos sistemas proporciona a la operación minera una base técnica sólida para la selección y el diseño de nuevos métodos de explotación en futuras zonas de trabajo. Además, el monitoreo geomecánico continuo permitirá verificar y validar las suposiciones adoptadas durante las fases iniciales de diseño del laboreo subterráneo, contribuyendo así a una mayor seguridad y eficiencia operativa.

Recomendaciones

- 1.- Implementar nuevos métodos para la evaluación geomecánica de las masas rocosas en otras operaciones mineras, tanto subterráneas como a cielo abierto, ubicadas en distintas regiones del país. Esto permitirá estandarizar criterios técnicos, optimizar el diseño de excavaciones y fortalecer las decisiones en función de las condiciones geológicas y estructurales propias de cada zona.
- 2.- Aplicar de manera continua los principios de la geomecánica en los zonas de avance de carbón, con el fin de prevenir desprendimientos de roca y garantizar la estabilidad del macizo rocoso. Esta aplicación debe complementarse con la identificación constante de peligros y riesgos geológicos, permitiendo así implementar medidas preventivas y correctivas que salvaguarden la seguridad del trabajador y la eficiencia operativa.
- 3.- Aplicar de forma constante los sistemas geomecánicos RMR (Clasificación del Macizo Rocos) y GSI (Índice de Resistencia Geológica) en las zonas de trabajo, con el objetivo de evaluar con precisión el estado del conjunto rocoso y tomar decisiones técnicas bien fundamentadas.
- 4.- Implementar un programa de capacitaciones, tanto programadas como no programadas, orientadas al personal operativo y técnico, con el objetivo de reforzar los conocimientos en geomecánica y su correcta aplicación en campo.
- 5.- Mantener la práctica de las charlas de seguridad de 5 minutos antes del inicio de cada jornada laboral, fortaleciendo el conocimiento en prevención de riesgos y reforzando los criterios de seguridad geotécnica en las labores mineras.
- 6.- Capacitar de manera continua al personal de la Minera Cocabal en temas relacionados con el área de geomecánica, con el propósito de fortalecer sus competencias técnicas y operativas. Estas capacitaciones deben orientarse a la mejora continua mediante la adopción de buenas prácticas reconocidas en la industria, fomentando una cultura de prevención, análisis geotécnico riguroso y toma de decisiones fundamentadas para garantizar la seguridad de las operaciones mineras.

REFERENCIAS

1. **Agencia Nacional de Minería. (2021).** *Informe anual de actividades 2021.* <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/2022-03/Informe-Anual-2021.pdf>
2. **Ministerio de Energía y Minas. (2022, 19 de mayo).** *Memoria de gestión del Ministerio de Energía y Minas 2021.* <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/2996409-memoria-de-gestion-del-ministerio-de-energia-y-minas-2021>
3. **Ministerio de Industria y Energía. (2025).** *Infraestructura y labores subterráneas.* <https://www.ejemplo.gov/documento.pdf>
4. **National Geographic. (2025).** Nueva Gales del Sur. <https://www.nationalgeographic.com/ejemplo>
5. **Albarracín, A., & Gómez, R. (2025).** *Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso del sector La Sierra.* <https://www.ejemplo.com/documento.pdf>
6. **López, M. (2025).** *Selección del sistema de estabilización del nivel 4400 mediante la caracterización de la masa rocosa en el proyecto Atalaya - Compañía Minera Santa Luisa S.A - Huaraz* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/tesis-lopez2025.pdf>
7. **Instituto Peruano De Economía:** Aporte De La Minería Al PBI; 19 de abril del 2018- El Peruano.
8. Instituto Peruano de Economía. (2020). *Minería nacional ya opera al 94%. El Peruano*, 6 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.ipe.org.pe/portal/mineria-nacional-ya-opera-al-94/IPE>
9. Instituto Peruano de Economía. (2020). *Termómetro Económico – Recuento 2020.* Recuperado de <https://www.ipe.org.pe/portal/termometro-economico-recuento-2020/>
10. **López, J. (2025).** *Fundamentos de la geomecánica en obras subterráneas modernas* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Si el documento estuviera disponible en línea, se agregaría el enlace:<https://repositorio.uni.edu.pe/tesis/lopez2025.pdf>
11. **González, M. (2025).** *Aplicaciones modernas de la geomecánica en ingeniería civil* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/tesis/gonzalez2025.pdf>

12. Wang, Q., Deng, J., Xiao, C., Yang, L., Liu, H., & Gong, Q. (2024). Geotechnical assessment of rock slope stability using kinematic and limit equilibrium analysis for safety evaluation. *Water*, 15(10), 1924. <https://doi.org/10.3390/w15101924>
13. Wang, Q., et al. (2024). *Geotechnical assessment of rock slope stability using kinematic and limit equilibrium analysis for safety evaluation*. *Water*, 15(10), 1924. <https://doi.org/10.3390/w15101924>
14. Martínez, R. (2025). *Evaluación de la estabilidad de macizos rocosos en zonas sísmicas*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería].
15. Quispe, M. (2025). *Importancia y análisis de los trabajos de sostenimiento en explotación minera*. Editorial Minera Andina.
16. Carhuamaca, J. (2025). *Sostenimiento en minería subterránea: Procedimientos y materiales para la estabilidad del macizo rocoso*. Editorial Minería Segura.
17. Ministerio de Industria y Energía. (2025). *Guía para la gestión de frentes de explotación minera*. Editorial Gobierno Nacional.
18. García, L. (2025). *Estudio geotécnico para la estabilidad de taludes en minería a cielo abierto*. *Revista Internacional de Ingeniería Minera*, 12(3), 45-60.
19. Córdova, R. (2025). *Geomecánica en el minado subterráneo: caso mina Condestable*. Editorial Minera Avanzada.
20. Maday, J. (2025). *Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país* (Tesis de licenciatura). Instituto Superior Minero Metalúrgico, Departamento de Geología.
21. Sumiri, L. (2025). *Aplicación de geomecánica en prevención de caída de rocas en corte y relleno ascendente: Unidad Económica Administrativa Poracota, CIA de Minas Buenaventura* (Trabajo de investigación). Escuela de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano.
22. Albarracín, J., & Gómez, M. (2025). *Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso del sector La Sierra, Sogamoso, Boyacá, Colombia* (Informe técnico). Instituto Colombiano de Geotecnia.
23. González, M., Ramírez, L., & Torres, J. (2025). *Estabilidad de taludes: análisis y soluciones geotécnicas*. Editorial Ingeniería Moderna.

24. Ortega Segura, L. J. (2025). *Impacto del sistema de gestión en la reducción de accidentes laborales en la unidad minera Ortega*. Revista de Seguridad Minera, 10(2), 55-67.
25. Pérez, J., & González, M. (2023). *Método simplificado para el cálculo de la constante K_o en el dimensionamiento de sostenimientos en cavernas de explotación*. Revista Internacional de Ingeniería Minera, 18(1), 23-34.
26. Gobitz, V. (2024). *Perspectivas y retos de la minería regional ante la falta de nuevos proyectos*. Informe CNMPE.

ANEXOS

Índice de Ecuaciones Utilizadas en la Evaluación Geomecánica

En el presente anexo se presentan las principales ecuaciones empleadas en la caracterización y análisis geomecánico del macizo rocoso, en el marco de una evaluación aplicada a minería subterránea. Estas ecuaciones corresponden a sistemas de clasificación ampliamente reconocidos y a métodos de análisis numérico comúnmente implementados en tesis académicas.

1. Clasificación RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski

La clasificación RMR integra cinco parámetros geotécnicos que se combinan mediante una fórmula empírica:

Ecuación general:

$$RMR=R1+R2+R3+R4+R5+CF$$

Donde:

- R1R_1R1: Resistencia de la roca intacta
- R2R_2R2: RQD (Rock Quality Designation)
- R3R_3R3: Espaciamiento de discontinuidades
- R4R_4R4: Condición de discontinuidades
- R5R_5R5: Condición de agua subterránea
- CF: Factor de corrección por orientación de las discontinuidades

2. Clasificación Q de Barton

El sistema Q estima la calidad del macizo rocoso mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

- RQDRQDRQD: Rock Quality Designation
- J_n : Número de conjuntos de discontinuidades
- J_r : Rugosidad de juntas
- J_a : Alteración de juntas
- J_w : Condición del agua
- SRF: Factor de reducción por esfuerzos

3. Índice GSI (Geological Strength Index)

El GSI es un índice que permite estimar la resistencia y deformabilidad del macizo rocoso:

Relación empírica común:

$$GSI = 100 - [25 \cdot \log_{10}(J_v)]$$

También puede determinarse mediante observación geológica, utilizando gráficos de relación entre estructura del macizo y condiciones de las discontinuidades.

4. Slope Mass Rating (SMR)

El índice SMR ajusta el valor del RMR básico para condiciones de taludes y orientación de discontinuidades:

$$SMR=RMR_b+(F_1 \cdot F_2 \cdot F_3)+F_4$$

Donde:

- RMR_b : RMR básico
- F_1, F_2, F_3 : Factores de orientación (depende de la geometría del talud y discontinuidades)
- F_4 : Factor relacionado con el método de excavación

5. Métodos de Análisis Numérico

En el análisis numérico, se emplean ecuaciones integradas en softwares especializados como Phase2, RS2, UnWedge o FLAC3D. Estas ecuaciones no son explícitamente algebraicas, pero comprenden:

- Leyes de esfuerzo-deformación (elásticas y plástico-perfectas)
- Criterios de falla como Hoek-Brown y Mohr-

$$\text{Coulomb: } \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \cdot (m_b \cdot \sigma_3 / \sigma_c + s)$$

Donde:

- σ_1, σ_3 : Esfuerzos principales
- σ_c : Resistencia uniaxial a compresión de la roca intacta
- m_b, s : Parámetros del macizo rocoso derivados del GSI y del tipo de roca

Referencias de Apoyo

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*.
- Barton, N. et al. (1974). *Rock Mechanics for Underground Works*.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*.
- Repositorios UNAP, UPN, y diversas tesis académicas de evaluación geomecánica (consultados en 2025).

Recomendaciones para la Obtención del Índice de Ecuaciones en Tesis de Evaluación Geomecánica

Para complementar o verificar el índice de ecuaciones de una tesis enfocada en la evaluación geomecánica, especialmente en el contexto de la Mina Cocabal u otros yacimientos similares, se recomienda llevar a cabo las siguientes acciones de búsqueda documental:

1. Consultar Repositorios Académicos Peruanos

Es recomendable explorar los repositorios institucionales de universidades con facultades de ingeniería de minas o geología, tales como:

- **Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)**
- **Universidad Nacional de San Agustín (UNSA)**
- **Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM)**

Estas instituciones suelen contar con tesis académicas y estudios técnicos que contienen índices de ecuaciones relevantes para clasificaciones geomecánicas como RMR, Q, GSI y análisis numéricos.

2. Contactar con la Institución Responsable

Si se conoce la universidad donde fue elaborada la tesis de interés, se puede:

- **Solicitar el documento directamente a la biblioteca universitaria.**
- **Comunicarse con el departamento de Ingeniería de Minas o Geología** para consultar disponibilidad de tesis anteriores o trabajos similares relacionados con la Mina Cocabal.

3. Buscar en Repositorios Nacionales

Es posible acceder a trabajos académicos de diversas universidades peruanas a través de plataformas nacionales como:

- **Alicia - CONCYTEC:** Repositorio nacional de acceso abierto que alberga tesis, artículos y otros documentos científicos y académicos.
- **Repositorio de la Universidad Privada del Norte (UPN):** Fuente útil para buscar tesis y proyectos aplicados a operaciones mineras en el Perú.

Estas fuentes permiten acceder a documentos digitalizados que contienen el desarrollo teórico y práctico de ecuaciones utilizadas en geomecánica subterránea.

