

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Caracterización geomecánica de la masa rocosa
mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta
del sistema de fortificación**

Juan Carlos Diaz Velásquez
Erika Claudia Vicente Llana
Lenin Kennedy Vilcapoma Egoavil

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



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

ASESOR

Ing. Julio Fredy Porras Mayta.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a Dios por todas sus bendiciones; así también a nuestros padres, por habernos dado la oportunidad de formarnos en una prestigiosa universidad, brindándonos todo su apoyo ante las adversidades.

De igual manera, agradecemos a la Universidad Continental, así como a la Escuela Académica Profesional de Ingeniería de Minas, a nuestros ingenieros y en especial a nuestros tutores, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que podamos crecer día a día como profesionales; gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente, queremos expresar nuestro más grande y sincero agradecimiento al Ing. Julio Porrás Mayta, por su fundamental colaboración durante el proceso de investigación, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración, permitió el desarrollo de nuestra tesis.

DEDICATORIA

Dedicamos el presente trabajo de investigación a nuestros padres y familiares, quienes a lo largo de nuestra vida han velado por nuestro bienestar y educación, enseñándonos que la mejor libertad del ser humano está en la superación personal e intelectual, y a todos los que creyeron en nosotros dándonos su apoyo incondicional para la elaboración de nuestra tesis.

ÍNDICE

ASESOR	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.2. Formulación del problema	2
1.1.2.1. Problema general.....	2
1.1.2.2. Problemas específicos	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Justificación e importancia.....	3
1.3.1. Justificación social	3
1.4. Hipótesis y variables.....	4
1.4.1. Hipótesis general.....	4
1.4.2. Hipótesis específicas.....	4
1.4.3. Descripción de las variables	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes de la investigación.....	6

2.1.1.	Antecedentes nacionales.....	6
2.1.2.	Antecedentes internacionales.....	11
2.2.	Bases teóricas.....	17
2.2.1.	Caracterización geomecánica.....	17
2.2.2.	Características de las rocas.....	17
2.2.2.1.	Rocas ígneas.....	17
2.2.2.2.	Rocas sedimentarias.....	17
2.2.2.3.	Rocas metamórficas.....	17
2.2.3.	Discontinuidades de la masa rocosa.....	18
2.2.4.	Propiedades de las discontinuidades.....	21
2.2.5.	Representación espacial de los sistemas de discontinuidades.....	25
2.2.6.	Clasificaciones geomecánicas de la masa rocosa.....	27
2.3.	Definición de términos.....	33
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		36
3.1.	Método, tipo y nivel de la investigación.....	36
3.1.1.	Método de la investigación.....	36
3.1.2.	Tipo de la investigación.....	36
3.1.3.	Nivel de la investigación.....	36
3.2.	Diseño de la investigación.....	37
3.3.	Población y muestra.....	37
3.3.1.	Población.....	37
3.3.2.	Muestra.....	37
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	37
3.4.1.	Técnicas de recolección de datos.....	37
3.4.2.	Instrumentos de recolección de datos.....	38
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		39
4.1.	Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	39
4.1.1.	Descripción de las propiedades físicas del macizo rocoso.....	39

4.1.2.	Datos procesados con el programa Dips 7.0	42
4.1.3.	Análisis de los parámetros para la clasificación geomecánicas - clasificación geomecánica de Bieniawski - RMR (1989)	45
4.1.4.	Procesamiento de la información software Geo table cartilla RMR	60
4.1.5.	Análisis de costos.....	64
4.2.	Discusión de resultados.....	67
CONCLUSIONES		69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		70
ANEXOS		72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Imagen de rocas sedimentarias.....	18
Figura 02. Imagen de zona de corte.....	19
Figura 03. Imagen de diaclasas o juntas.....	19
Figura 04. Imagen de planos de foliación.....	19
Figura 05. Imagen de zonas de contactos litológicos.....	20
Figura 06. Imagen de venillas.....	20
Figura 07. Imagen de pliegues.....	21
Figura 08. Imagen de un dique.....	21
Figura 09. Esquema de las propiedades de las discontinuidades.....	22
Figura 10. Orientación de las discontinuidades.....	22
Figura 11. Espaciado de una discontinuidad.....	23
Figura 12. Persistencia de discontinuidades.....	23
Figura 13. Grado de aspereza de discontinuidades.....	24
Figura 14. Apertura de una discontinuidad.....	24
Figura 15. Relleno de discontinuidades.....	25
Figura 16. Representación espacial de los sistemas de discontinuidades.....	25
Figura 17. Imagen de la masa rocosa meteorizada.....	26
Figura 18. Testigo de perforación diamantina.....	27
Figura 19. Presentación de la diorita.....	39
Figura 20. Diorita en lámina delgada.....	40
Figura 21. Diagrama QAPF que muestra la composición de la diorita con el porcentaje de cuarzo y feldespatos.....	41
Figura 22. Textura de la diorita.....	41
Figura 23. Cuadro de registro de muestras.....	43
Figura 24. Análisis de la concentración de polos de las discontinuidades en el programa Dips 7.0.....	43
Figura 25. Análisis de la densidad de polos de las discontinuidades en el programa Dips 7.0.....	44
Figura 26. Evaluación de Dip - Dip Direction en el programa Dips 7.0.....	44
Figura 27. Cálculo <i>in situ</i> RCU.....	48
Figura 28. Gráfico que muestra la descripción del espaciamento.....	50
Figura 29. Gráfico que muestra la descripción de la continuidad o persistencia.....	51
Figura 30. Gráfico que muestra la descripción de la abertura.....	52

Figura 31. Gráfico que muestra la descripción de la rugosidad.....	53
Figura 32. Longitud de muestreo versus profundidad.....	54
Figura 33. Perfiles típicos de rugosidad.....	55
Figura 34. Equivalencia de la rugosidad (JCR y RMR).....	55
Figura 35. Gráfico que muestra la descripción del tipo de relleno.....	56
Figura 36. Gráfico que muestra la descripción de la alteración.....	57
Figura 37. Gráfico que muestra la descripción del agua subterránea.....	58
Figura 38. Representación del rumbo de la discontinuidad.....	59
Figura 39. Representación del avance de la galería.....	59
Figura 40. Interface del software Geo table.....	61
Figura 41. Clasificaciones geomecánicas software Geo table.....	61
Figura 42. Procesamiento de la información en el software Geo table.....	62
Figura 43. Granito, calidad buena, varias familias de discontinuidades alteradas.....	62
Figura 44. Rumbo paralelo al eje de excavación.....	63
Figura 45. Reporte de la evaluación RMR.....	63
Figura 46. Reporte del autosostenimiento (RMR).....	64
Figura 47. Cuadro que muestra el costo total de Shotcrete.....	65
Figura 48. Cuadro que muestra el costo total acerca del perno helicoidal de 7".....	66
Figura 49. Representación del costo total de instalación de la malla electrosoldada.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Tamaño de bloque.....	28
Tabla 02. Estimación de las resistencias medias de ciertas robas según Bieniawski.....	29
Tabla 03. Clasificación de Deere del espaciado de las juntas.....	30
Tabla 04. Orientaciones relativas entre las juntas y el eje de cavidad.....	31
Tabla 05. Parámetros de clasificación y sus valores.....	32
Tabla 06. Ajuste de valores por orientaciones de las juntas.....	32
Tabla 07. Determinación de la clave del macizo rocoso.....	33
Tabla 08. Significado de la clase de macizos rocosos.....	33
Tabla 09. Cálculo de la resistencia de la roca intacta.....	46
Tabla 10. Número de rebotes del martillo de Schmidt.....	47
Tabla 11. Número de rebotes del martillo (225 MPa).....	48
Tabla 12. Clasificación de las rocas de acuerdo con su resistencia y compresión.....	49
Tabla 13. Valoración del índice de designación de la calidad de roca (RQD).....	50
Tabla 14. Valoración del espaciamiento.....	50
Tabla 15. Valoración de la continuidad o persistencia.....	51
Tabla 16. Valoración de la abertura.....	52
Tabla 17. Indicador de peine de Barton.....	53
Tabla 18. Valoración del tipo de relleno.....	56
Tabla 19. Valoración de la alteración.....	57
Tabla 20. Valoración del agua subterránea.....	58
Tabla 21. Descripción para la orientación de túneles.....	60
Tabla 22. Valoración de la orientación de túneles.....	60

RESUMEN

En la presente investigación se planteó como objetivo general efectuar la valoración de la caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021, así como la hipótesis general fue que la caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski, realizando la evaluación de las propiedades físicas - mecánicas de la roca intacta y macizo rocoso, influyen en la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021. El método general de investigación fue el científico, de tipo aplicado, de nivel explicativo - correlacional y de diseño cuasi experimental. La población estuvo conformada por todas las galerías de la mina artesanal Paucartambo Pasco, mientras que la muestra fue delimitada no probabilísticamente, la cual fue escogida por interés de los investigadores y estuvo conformada por el nivel cero. Producto de la investigación se concluye que la caracterización geomecánica se encuentra en el rango de 61 - 80 puntos que lo describe como roca buena, considerando el ángulo de cohesión de la masa rocosa KPa 300 - 400, el ángulo de fricción de masa rocosa 35° - 45° y el tiempo de autosostenimiento es de 6 meses con 7 m de Span.

Palabras clave: caracterización geomecánica de la masa rocosa, cartilla de Bieniawski, sistema de fortificación.

ABSTRACT

In this research, the general objective was to carry out the evaluation of the geomechanical characterization of the rock mass using the Bieniawski primer for the proposal of the fortification system at level 0 artisanal mine Paucartambo Pasco 2021, as well as the general hypothesis was that the characterization Geomechanics of the rock mass using the Bieniawski primer, evaluating the physical - mechanical properties of the intact rock and rock massif, influencing the proposal of the fortification system at level 0 artisanal mine Paucartambo Pasco 2021. The general research method was scientific, applied type, explanatory - correlational level and quasi-experimental design. The population was made up of all the galleries of the Paucartambo Pasco artisanal mine, while the sample was delimited non-probabilistically, which was chosen for the interest of the researchers and was made up of level zero. As a result of the research, it is concluded that the geomechanical characterization is in the range of 61 - 80 points that describes it as good rock, considering the angle of cohesion of the rock mass KPa 300 - 400, the angle of friction of the rock mass 35° - 45° and the self-sustaining time is 6 months with 7 m Span.

Keywords: geomechanical characterization of the rock mass, Bieniawski primer, fortification system.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación titulada “Caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta del sistema de fortificación”, partió de la problemática que se detalla a continuación.

Durante una visita de estudio a las minas artesanales, donde se explotan minerales de oro, ubicadas en el Centro Poblado de Acopalca, jurisdicción Anexo Los Andes ubicado entre las quebradas de Rancasjasa y Suirupata, se pudo observar que por la falta de un asesoramiento técnico profesional los mineros artesanales están expuestos a diferentes accidentes debido, en primer lugar, al desprendimiento de rocas, lo que se evidencia con paralizaciones de las jornadas laborales, además se identificó que sus cuadros de madera no muestran un diseño adecuado, debido a que éstos no están en contacto con el macizo rocoso y encima de este tipo de sostenimiento hay costales de arena y rocas. De esta manera surgió el interés de solucionar dicho problema sobre el tipo sostenimiento en la mina para evitar accidentes o incidentes laborales.

Para tener el conocimiento del macizo rocoso, existen muchas clasificaciones geomecánicas, donde las principales son Deere (RQD) y Bieniawski (RMR89), que determinan la calidad del macizo rocoso, cuya finalidad es dividir a éste en dominios estructurales de características similares como litología, espaciado de juntas, entre otros.

Las clasificaciones geomecánicas son métodos fundamentales de ingeniería, que permiten evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos y estimar los parámetros geotécnicos de diseño, además permiten determinar el tipo de sostenimiento de un túnel o una labor minera.

Para dar respuesta a la propuesta de solución a la investigación, el trabajo se dividió en cuatro capítulos, los cuales se presentan como sigue.

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del estudio, en el cual se detalla el planteamiento y formulación del problema dando a conocer el problema general y los específicos, del mismo modo, se cita el objetivo general y los específicos, seguidamente de la justificación social; para culminar este capítulo, se exponen la hipótesis general, específica y las variables de esta investigación.

En el Capítulo II, denominado Marco Teórico, se citan los antecedentes nacionales e internacionales, del mismo modo se exponen las bases teóricas y para finalizar se da a conocer la definición de términos básicos de la investigación.

En el Capítulo III se expone a la metodología empleada en la investigación, resaltando el método general, tipo, nivel, diseño, población y muestra, así como las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En el Capítulo IV se exponen los resultados de la investigación y la discusión de éstos, donde se dan a conocer los datos, y su análisis, que se obtuvieron de la investigación.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

Los autores.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Durante una visita de estudio a las minas artesanales, donde se explotan minerales de oro, ubicadas en el Centro Poblado de Acopalca, jurisdicción Anexo Los Andes ubicado entre las quebradas de Rancasjasa y Suirupata, se pudo observar que por la falta de un asesoramiento técnico profesional los mineros artesanales están expuestos a diferentes accidentes debido, en primer lugar, al desprendimiento de rocas, lo que se evidencia con paralizaciones de las jornadas laborales, además se identificó que sus cuadros de madera no muestran un diseño adecuado, debido a que éstos no están en contacto con el macizo rocoso y encima de este tipo de sostenimiento hay costales de arena y rocas. De esta manera surgió el interés de solucionar dicho problema sobre el tipo sostenimiento en la mina para evitar accidentes o incidentes laborales.

Para tener el conocimiento del macizo rocoso, existen muchas clasificaciones geomecánicas, donde las principales son Deere (RQD) y Bieniawski (RMR89), que determinan la calidad del macizo rocoso, cuya finalidad es dividir a éste en dominios estructurales de características similares como litología, espaciado de juntas, entre otros.

Las clasificaciones geomecánicas son métodos fundamentales de ingeniería, que permiten evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos y estimar los parámetros geotécnicos de diseño, además permiten determinar el tipo de sostenimiento de un túnel o una labor minera, en tal sentido se hace necesario realizar un estudio geomecánico de la labor principal para proponer el sistema de fortificación.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es el valor de la caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el valor de la resistencia de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación?
- ¿Cuál es el resultado de la evaluación de la designación de calidad de roca de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación?
- ¿Cuál es el resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa para la propuesta del sistema de fortificación?
- ¿Cuál es el resultado de la evaluación del agua subterránea para la propuesta del sistema de fortificación?
- ¿Cuál son los parámetros técnicos y económicos del sistema de fortificación?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el valor de la caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar el valor de la resistencia de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación.
- Calcular la evaluación de la designación de calidad de roca de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación.
- Establecer el resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa para la propuesta del sistema de fortificación.
- Estimar el resultado de la evaluación del agua subterránea para la propuesta del sistema de fortificación.
- Especificar los parámetros técnicos y económicos del sistema de fortificación.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación social

El incremento de los accidentes por caídas de rocas en los últimos años en el Perú, representa una preocupación puesto que dichos índices miden el desempeño de una empresa e indica el nivel en el cual nos encontramos en materia de seguridad en el trabajo; ante el reto de disminuir dichos índices, orientado en mejorar el desempeño laboral y encontrar las herramientas para optimizar la productividad, se aborda a una empresa minera artesanal, sustentado porque se busca solucionar el problema asociado al desprendimiento de rocas.

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas de sostenimiento en túneles. Las mismas corresponden a un método que permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, y a partir de ello estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel.

1.4. Hipótesis y variables

1.4.1. Hipótesis general

H1: La caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski, realizando la evaluación de las propiedades físicas-mecánicas de la roca intacta y macizo rocoso, influye en la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021.

1.4.2. Hipótesis específicas

- El valor de la resistencia de la roca intacta mediante la prueba de carga puntual tiene relación directa para la propuesta del sistema de fortificación.
- Del valor del parámetro de la designación de calidad de roca de la roca intacta permite medir el grado de fracturamiento que se relaciona con la propuesta del sistema de fortificación.
- El resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa permite determinar las condiciones de las desfavorables de la masa que sirve para la propuesta del sistema de fortificación.
- De la evaluación del agua subterránea se establece el intemperismo que actúa en el macizo rocoso lo cual tiene relación directa para la propuesta del sistema de fortificación.

- Los parámetros técnicos y económicos permiten establecer el tipo, costo y vida útil del sistema de fortificación.

1.4.3. Descripción de las variables

a) Variable independiente (X):

- Caracterización geomecánica de la masa rocosa:

Indicadores:

- Resistencia de la roca intacta.
- Designación de calidad de roca.
- Condiciones de las juntas de la masa rocosa.
- Agua subterránea.
- Parámetros técnicos y económicos del sistema de fortificación.

b) Variable dependiente (Y):

- Sistema de fortificación:

Indicadores:

- Parámetros técnicos y económicos del sistema de fortificación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes nacionales

En la tesis de Sosa (1) titulada: “Evaluación geomecánica para el diseño de tajeos de producción en la Unidad Minera Cerro Lindo - Compañía Minera Milpo” se tuvieron los siguientes objetivos:

- Realizar la evaluación geomecánica de la masa rocosa para el diseño de los tajeos de producción en la Mina Cerro Lindo CIA. Minera Milpo.
- Investigar los estudios de campo de la masa rocosa para determinar su calidad.
- Determinar los índices geomecánicos de las labores subterráneas en la Mina Cerro Lindo.
- Considerar los parámetros necesarios para el diseño de los tajeos de producción en la Mina Cerro Lindo.

Producto de su investigación concluyó que:

- El yacimiento de Cerro Lindo está emplazado en rocas de la formación Huaranguillo perteneciente a la secuencia volcánica - sedimentaria del Cretáceo Medio a Inferior denominada Grupo Casma, que descansa como un techo colgado, con rumbo general N 60°W y un buzamiento preferencial SW, sobre los intrusivos del Batolito de la Costa

pertenciente al Cretáceo Superior hasta el Terciario; esta faja intrusiva está compuesta por rocas granodioritas, tonalitas y dioritas de afinidad calcoalcalinas.

- Los cuerpos mineralizados de Cerro Lindo están emplazados en rocas volcánicas de tipo riolíticas gradando a riodacita. También está presente en el área de estudio una unidad piroclástica que se intercala dentro de unidades de flujos riolíticos.
- El yacimiento Cerro Lindo es un depósito de sulfuro masivo vulcanogénico (VMS Volcanogenic Massive Sulphide) tipo Kuroco. Presenta una orientación NW, buzando 65°SW y tiene dimensiones de 1350 m de largo, 83 m de ancho y 245 m de profundidad. Tiene 7 cuerpos mineralizados (OB1 al 7).
- La litología simplificada de la mina Cerro Lindo involucra a 3 tipos de rocas: (i) los sulfuros donde está el mineral, (ii) los volcánicos y (iii) los diques. Los volcánicos aparecen alrededor de los sulfuros conformando la roca encajonante, mientras los diques cortan transversalmente a la zona de sulfuros y a los volcánicos. Dentro de la zona mineralizada aparecen enclaves de roca volcánica que son extraídos junto con el mineral durante la explotación del yacimiento.
- El análisis de distribución de discontinuidades ha indicado que el arreglo estructural de la masa rocosa dentro de cada litología de Cerro Lindo, debajo del nivel 1800, está conformado por 2 sistemas principales de discontinuidades, siendo uno de ellos el dominante, y de 1 a 2 sistemas secundarios.
- Todos estos sistemas están conformados mayormente por diaclasas y fallas. El sistema 1 involucra a fallas transversales a los cuerpos mineralizados, aparte del arreglo estructural general de las áreas del OB2 y OB5, de manera localizada se presentan discontinuidades aleatorias.
- Los resultados de la clasificación geomecánica de la masa rocosa debajo del nivel 1820, efectuada a partir de la información registrada en el mapeo geomecánico de labores subterráneas; en el OB5 y OB6, las masas rocosas de calidad "Buena (II)" representan el 34 %, las de calidad "Regular A (IIIA)" representan el 33 %, las de calidad "Regular B (IIIB)" representan el 20 %, mientras que las de calidad "Mala A

(IVA)” representan el 6 % y las de “calidad Mala B (IVB)” representan el 7 %.

- Los parámetros de resistencia de la roca intacta, de las discontinuidades y de la masa rocosa, determinados a partir de ensayos realizados en campo y en laboratorio y a partir de la utilización de criterios de falla apropiados.
- En la mina Cerro Lindo no es muy significativa la presencia de agua subterránea, generalmente las condiciones naturales son de secas a húmedas. La presencia de agua está relacionada principalmente a la operación minera: agua de las perforaciones de producción, el agua de las perforaciones diamantinas, y el agua del relleno, que se infiltran en la masa rocosa y percolan hacia las labores inferiores.
- Utilizando toda la información básica mencionada en las conclusiones precedentes, se han realizado una serie de análisis que comprenden el dimensionamiento de los diferentes componentes estructurales asociados al minado, lo cual se desarrolló en función del arreglo estructural de la masa rocosa y del comportamiento esfuerzo/deformación de la misma, determinando así las dimensiones apropiadas mostradas en el capítulo VI.

En la tesis de Loarte (2) titulada “Geomecánica para el diseño del sostenimiento de las labores mineras en la Corporación Minera Toma La Mano - Cormitoma S.A. - año 2018”, se tuvieron los siguientes objetivos:

- Determinar en base a la geomecánica el diseño del sostenimiento de las labores mineras en la Corporación Minera Toma La Mano - Cormitoma S.A. - año 2018.
- Determinar la clasificación del macizo rocoso para el diseño del sostenimiento en la Corporación Minera Toma La Mano - Cormitoma S.A. - año 2018.
- Determinar los procedimientos de instalación de los sistemas de sostenimiento en la Corporación Minera Toma La Mano - Cormitoma S.A. - año 2018.

Producto de su investigación se concluyó que:

- En este caso el sostenimiento es esporádico, ya que el levantamiento litológico estructural se realizó en la zona mineralizada. Split set de 5 y 7 pies espaciados cada uno de 1.2 x 1.2 m distribuidos en forma de tres bolillos más (+) malla electrosoldada en terrenos muy fracturados o cuadros de madera donde requiera.
- Los puntales de seguridad, en las partes donde requiera, garantizan hacer un buen control de perforación y voladura.
- El sostenimiento, en caso los requiera, asociado a los procesos de meteorización de la roca, de orientan en un control preventivo.
- En lo referente al sostenimiento de acuerdo a los valores determinados por Bieniawski (RMR) y Barton (Q), en el caso del mineral no requiere sostenimiento; en el caso de la Zona de Contacto, el sostenimiento es esporádico, ya que el levantamiento litológico estructural se realizó en la zona mineralizada; en el caso de la Pizarra el sostenimiento será a través de Split set de 5 y 7 pies espaciados cada uno de 1.2 x 1.2 m distribuidos en forma de tres bolillos más (+) malla electrosoldada en terrenos muy fracturados o cuadros de madera donde requiera; en el caso de la Cuarcita el sostenimiento será con puntales de seguridad, en las partes donde requiera, siendo necesario hacer un buen control de perforación y voladura; en el caso de la Granodiorita será cuando lo requiera.
- En lo relacionado a las propiedades físico - mecánicas del macizo rocoso de la Corporación Minera Toma La Mano - Cormitoma S.A., se determinó para las tres rocas predominantes:
 - o Pizarra:
 - Cohesión: 1.7785 kg/cm².
 - Angulo de fricción: 28.018°.
 - Esfuerzo a la tracción: - 2.156 MPa.
 - Esfuerzo compresivo: 5.6926 MPa.
 - Esfuerzo al corte: 4E-01 MPa.
 - Módulo de deformación *in situ*: 16.50 GPa.
 - Densidad: 23.66 kN/m³.
 - o Cuarcita:
 - Cohesión: 3.8392 kg/cm².
 - Angulo de fricción: 55.441°.

- Esfuerzo a la tracción: - 1.927 MPa.
- Esfuerzo compresivo: 23.837 MPa.
- Esfuerzo al corte: 2E-67 MPa.
- Módulo de deformación *in situ*: 39.25 GPa.
- Densidad: 24.275 kN/m³.
- Granodiorita:
 - Cohesión: 5.379 kg/cm².
 - Angulo de fricción: 61.794°.
 - Esfuerzo a la tracción: - 2.157 MPa.
 - Esfuerzo compresivo: 40.221 MPa.
 - Esfuerzo al corte: 5E-164 MPa.
 - Módulo de deformación *in situ*: 63.75 GPa.
 - Densidad: 24.56 kN/m³.

En la tesis de Julca (3) titulada “Estudio geomecánico y voladura de rocas en nivel 2215 - Mina Candelaria - CMH S.A.C. - 2019”, se tuvieron los siguientes objetivos:

- Determinar cómo influye el estudio geomecánico en la voladura de rocas del nivel 2215 de la Mina Candelaria de Consorcio Minero Horizonte S.A.C.
- Determinar de qué manera influye el estudio geomecánico en los avances del nivel 2215 de la Mina Candelaria de Consorcio Minero Horizonte S.A.C.
- Determinar cómo influye el estudio geomecánico en la sobrerotura del nivel 2215 de la Mina Candelaria de Consorcio Minero Horizonte S.A.C.

Producto de su investigación, concluyó que:

- El estudio geomecánico influye significativamente en la voladura de rocas del nivel 2215 de la Mina Candelaria del Consorcio Minero Horizonte S.A.C., especialmente en la RP 850S.
- Actualmente en los frentes de la Mina Candelaria, los llamados factores de carga o de potencia son en promedio de 0.340 kg/TM, lo adecuado es de 0.230 kg/TM y el factor de energía debe ser 0.790

MJ/TM, lo que indica que se está usando explosivo de manera sobredimensionada, aproximadamente mayor a 32 % de lo requerido. Este exceso afecta el costo de voladura y crea inestabilidad en la masa rocosa.

- El estudio geomecánico permite determinar el factor de carga y el factor de energía que requiere la masa rocosa antes de realizar la voladura en sí, esto permite disminuir los costos y evitar la sobrerotura.
- Para la disminución de la sobrerotura, saber anticipadamente el factor de carga permite diseñar mallas de perforación y voladura con voladura controlada en la corona y los hastiales de las labores.
- La caja techo del nivel 2215 de la Mina Candelaria, RP 850S, ubicada en la Zona Sur de Parcoy, resulta ser una Roca IV, RMR = 21 - 30, calidad Mala B; la caja piso es una Roca IV, RMR = 21 - 30, calidad Mala B; en relación a la veta Candelaria, es una Roca IV, RMR = 30 - 40, siendo calidad Mala A; además, existe partes de la veta en las que existen vetas tipo Roca III, 41 - 50, calidad Regular B.

2.1.2. Antecedentes internacionales

En el artículo científico de Cartaya (4) titulado “Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país”, se tuvieron los siguientes objetivos:

- Caracterizar desde el punto de vista geomecánico los macizos rocosos de las Minas de cromo Merceditas, Amores y de cobre “El Cobre”, de los túneles hidro técnicos de los Trasvases Melones - Sabanilla y Caney - Gilbert.
- Realizar el estudio ingeniero - geológico de los macizos rocosos.
- Determinar los parámetros geomecánicos de los macizos estudiados.
- Proponer los modelos geomecánicos más representativos de los macizos rocosos de las obras estudiadas.
- Proponer criterios geomecánicos estructurales que permitan un mejor diseño de excavaciones y obras subterráneas.

Producto de su investigación alcanzó los siguientes resultados:

- Se establecen las principales características geomecánicas de los macizos rocosos estudiados y se proponen los modelos geomecánicos más representativos para cada caso.
- La metodología de investigación desarrollada constituye un aporte científico y brinda elementos novedosos, además es aplicable a cualquier tipo de macizo tanto en obras subterráneas como de superficie.
- Los resultados del estudio del agrietamiento de los macizos rocosos muestran que un gran porcentaje de ellos se presentan agrietados, lo que se relaciona a las formas preponderantes en que se manifiesta la pérdida de su estabilidad y el mecanismo de actuación de la presión.
- Como resultado de la evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos según su calidad y estabilidad, se obtiene que predominan los macizos de calidad regular, aunque en diferentes sectores y obras se presentan macizos en mal estado, lo que es condicionado, además, de por los problemas estructurales, por el deterioro que ellos han sufrido por efectos del agua, la erosión y la atmósfera subterránea.
- Se obtuvieron un grupo de criterios geomecánicos - estructurales que pueden ser aplicados para el diseño de excavaciones y obras subterráneas, fundamentando su empleo.

En la tesis de Rincón (5) titulada “Caracterización geomecánica del macizo rocoso del área del contrato 01-068-96 “Cooperativa Cooprocabon Sugamuxi” municipio de Gámeza Boyacá”, se tuvieron los siguientes objetivos:

- Realizar la clasificación geomecánica del macizo rocoso del área del contrato 01-068-96 “Cooperativa Cooprocabon Sugamuxi” Municipio de Gámeza Boyacá.
- Realizar la recopilación, validación y análisis de la información existente.
- Realizar las visitas de campo, toma de muestras y de datos estructurales.
- Realizar ensayos de laboratorio y procesamiento de los mismos.

- Determinar la clasificación geomecánica del macizo rocoso por el método propuesto por Bieniawsky conocido como RMR (Rock Mass Rating).

Producto de su investigación, concluyó que:

- En la zona de estudio se encontraron arcillas de la formación Guaduas, areniscas de la formación Guaduas y principalmente carbones de la formación Guaduas, los cuales actualmente son explotados, pero su estabilidad se ve afectada por la alta sismicidad debido a la presencia de fallas. Además de esto la zona se ve afectada por la actividad minera subterránea que allí se realiza.
- La Cooperativa Cooprocarrón Sugamuxi posee tres bloques carboníferos delimitados por fallas regionales los cuales se denominan bloque Guantó Norte, Bloque Guantó Sur y Bloque Motua.
- El presente estudio se realizó con la clasificación propuesta por Bieniawski, la cual se concluyó clasificando el macizo rocoso como clase III calidad media con una valoración correspondiente al rango 60 - 41 (RMR) con una cohesión aproximada de 2 - 3 kg/cm², y un ángulo de rozamiento de 25° - 35°, indicando que es medianamente estable, pero al variar alguna de las condiciones estudiadas éste podría tender a fallar.
- Con el trabajo realizado con el programa Dips se pudo establecer dos familias de discontinuidades.
- Observando las características geomecánicas de la zona se encontró un movimiento de remoción en masa entre el bloque Guantó Norte y el bloque Motua, además allí se presenta el paso de la falla Tópaga, la falla Coyata y el anticlinal de Tierramiqui.

En la tesis de Betancur y López (6) titulada “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel veintiuno de la mina La Maruja (distrito minero de Marmato, Caldas) para estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte en la excavación y su correlación con las alteraciones hidrotermales”, se tuvieron los siguientes objetivos:

- Caracterizar y clasificar geo mecánicamente el macizo rocoso del nivel veintiuno de la mina subterránea La Maruja, usando los sistemas de clasificación RMR y Q para sectorizar el nivel y estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte que propendan por la estabilidad de la excavación y labores mineras. Además, analizar el efecto de las alteraciones hidrotermales en la calidad del macizo rocoso.
- Recopilar y analizar la información bibliográfica obtenida por parte de Gran Colombia Gold y diversas bases de datos bibliográficas de la Universidad EAFIT.
- Hacer un levantamiento sistemático de las discontinuidades y características geológicas del nivel objetivo.
- Elaborar un diagrama de polos y manejo estadístico de datos estructurales.
- Realizar la clasificación geomecánica por medio de la metodología RMR de Bieniawski y Q de Barton *et al.* en diferentes frentes del nivel veintiuno.
- Medir el valor de resistencia de la roca intacta a partir del rebote arrojado por el martillo de Schmidt (tipo L).
- Hacer un análisis de cuñas por medio del software Unwedge.
- A partir de los resultados y las variaciones sectoriales en los sistemas de clasificación, recomendar los tipos de soporte y cuidados necesarios para su instalación.
- Identificar y sectorizar variaciones en el comportamiento geomecánico del macizo en presencia de alteraciones hidrotermales, cambios litológicos y grado de fracturamiento.
- Comparar las clasificaciones del macizo rocoso sano, con las obtenidas para los sectores con las alteraciones hidrotermales del depósito.

Producto de su investigación se concluyó:

- Se realizó una clasificación geomecánica en el nivel 21 de la mina La Maruja, en el distrito minero de Marmato, Caldas y un análisis de cuñas con el fin de estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte; asimismo, se realizó una evaluación del efecto de las alteraciones

hidrotermales para correlacionar los resultados obtenidos de la clasificación geomecánica realizada en roca sana con las obtenidas en los sectores con presencia de alteración hidrotermal.

- Este trabajo se enfocó en dos ambientes geotécnicos importantes, a saber: roca caja y zonas mineralizadas. La roca encajante presenta mejor calidad debido a que la alteración hidrotermal tuvo un comportamiento poco pervasiva en estas zonas. En contraste, las zonas mineralizadas presentan menor calidad, ya que reciben de forma directa los fluidos mineralizantes.
- La clasificación RMR y Q son de las clasificaciones más empleadas para la clasificación geomecánica en excavaciones, por ende, es importante la utilización de ambas metodologías, dado que, por la diferencia entre sus parámetros se complementan y permiten reducir el margen de error para la clasificación de un macizo rocoso. El RMR evalúa a mayor profundidad las discontinuidades mientras que por su parte el Q las analiza de manera superficial, siendo el SRF un parámetro a distinguir con respecto al RMR. Dado lo anterior, agregar el RMR posibilita que se sectorice y se definan con mayor exactitud y, por ende, una mejor clasificación.
- Los datos obtenidos según la metodología RMR para roca encajante varían entre 66 y 69 lo que equivale a una calidad buena. Por otra parte, el RMR en las zonas mineralizadas la calidad del macizo rocoso tiene una relación directa con el tipo de alteración argílica, siendo de menor calidad las vetas afectadas por la alteración argílica caracterizada por Sericita mientras que en las zonas de mayor calidad el mineral índice es la Esmectita.
- El resultado de la clasificación geomecánica por medio del método RMR es el siguiente: i) clasificación buena para las estaciones CB-02, CB-05, CB-07, CB-08 y CB-09, ii) clasificación regular para las estaciones CB-01, CB-04 y CB-06, iii) clasificación mala para las estaciones CB-03 y CB-10. Ahora bien, el resultado para la clasificación geomecánica por medio del Sistema Q es la siguiente: i) clasificación muy buena para la estación CB-09, ii) clasificación buena para las estaciones CB-02, CB-05, CB-07 y CB-08, iii) clasificación

regular para las estaciones CB-03 y CB-04, y iv) clasificación pobre para las estaciones CB-01, CB-06 y CB-10.

- Para el caso de roca caja predomina la alteración hidrotermal argílica, caracterizada por Sericita. Al correlacionarlo con la clasificación obtenida por el método RMR y Q, esta alteración se comporta de forma poco pervasiva en las estaciones CB-02, CB-05 Y CB-09 ya que la clasificación dio “buena” en las tres estaciones por el método RMR y “buena”, “buena” y “muy buena”, en las mismas estaciones, respectivamente por el Sistema Q.
- La resistencia a la compresión uniaxial (RCU) fue el parámetro más afectado en las zonas de veta, ya que las alteraciones hidrotermales cambian las características químicas y físicas de la roca.
- Para roca encajante el software DIPS arrojó cinco familias de diaclasas principales (83/217, 60/187, 61/151, 87/019 y 77/055). Por otra parte, las zonas mineralizadas arrojaron cuatro familias principales de diaclasas las cuales son: 70/250, 69/063, 39/159 y 79/034.
- El sostenimiento que se propuso depende del tipo de estructura, de la calidad de la roca obtenida por la metodología RMR y Q de Barton, el tipo de alteración y por último el tamaño y posición de las cuñas en la excavación.
- Dado lo anterior, para las zonas mineralizadas en las vetas Invasores Norte y veta Dolores se recomienda colocar arcos con hastiales de madera y el desabombe de cuñas. Para las vetas Invasores Este y 2511 se recomienda pernos localizados y desabombe. Por último, la veta Ovejo (estación CB-06) requiere de pernos de forma sistemática, además de malla con pernos. Así también, colocar uno u otro soporte dependerá de las condiciones puntuales de cada tramo ya que las características geológicas de las vetas no son homogéneas. Por otro lado, para las estaciones de roca encajante realizadas en las vetas: Santa Inés, cruzada Invasores Oeste y sobreguía Ovejo (estación CB-09), se requieren pernos localizados de máximo 2 m y desabombe de cuñas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Caracterización geomecánica

La caracterización geomecánica permite evitar y/o disminuir los incidentes/accidentes por caída de rocas, utilizando las herramientas, a fin de controlar la estabilidad de rocas, estableciendo tipos de sostenimiento en las diferentes labores mineras y garantizando la estabilidad de la masa rocosa, con el fin de brindar una operación segura y de calidad (7).

2.2.2. Características de las rocas

La roca es un conjunto de sustancias minerales que formando masas constituye gran parte de la corteza terrestre. Las rocas por su origen pueden ser ígneas, sedimentarias y metamórficas (7 pág. 2).

2.2.2.1. Rocas ígneas

Son aquellas que han sido formadas por la consolidación del magma (7 pág. 2).

2.2.2.2. Rocas sedimentarias

Formadas por la deposición de sedimentos, llegando a formar, como ejemplo, conglomerados (7 pág. 2).

2.2.2.3. Rocas metamórficas

Formadas al estar expuestas a procesos donde existen variaciones de presión y temperatura (7 pág. 2).

La roca difiere de la mayoría de otros materiales utilizados en la ingeniería. Ésta tiene discontinuidades (fracturas) de diferentes tipos que hacen que su estructura sea discontinua. Además, debido a los procesos geológicos que le han afectado entre el tiempo de su formación y la condición en la cual la encontramos en la actualidad, presenta heterogeneidades y propiedades variables. Todas estas características requieren ser evaluadas en forma permanente durante el laboreo minero (7 pág. 2).

2.2.3. Discontinuidades de la masa rocosa

Los principales tipos de discontinuidades presentes en la masa rocosa son:

- Planos de estratificación: son las que dividen en capas o estratos a las rocas sedimentarias (7 pág. 4).



Figura 01. Imagen de rocas sedimentarias.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Fallas: son fracturas que han tenido desplazamiento. Éstas son estructuras menores que se presentan en áreas locales de la mina o estructuras muy importantes que pueden atravesar toda la mina (7 pág. 4).
- Zonas de corte: son bandas de material de varios metros de espesor, en donde ha ocurrido fallamiento de la roca (7 pág. 5).



Figura 02. Imagen de zona de corte.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Diaclasas: también denominadas juntas, son fracturas que no han tenido desplazamiento y las que más comúnmente se presentan en la masa rocosa (7 pág. 5).



Figura 03. Imagen de diaclasas o juntas.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Planos de foliación o esquistosidad: se forman entre las capas de las rocas metamórficas dando la apariencia de hojas o láminas (7 pág. 6).



Figura 04. Imagen de planos de foliación.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Contactos litológicos: que comúnmente forman, por ejemplo, la caja techo y caja piso de una veta (7 pág. 6).



Figura 05. Imagen de zonas de contactos litológicos.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Venillas: son rellenos de las fracturas con otros materiales (7 pág. 7).



Figura 06. Imagen de venillas.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Pliegues: son estructuras en las cuales los estratos se presentan curvados (7 pág. 8).



Figura 07. Imagen de pliegues.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Diques: son intrusiones de roca ígnea de forma tabular, que se presentan generalmente empinadas o verticales (7 pág. 8).



Figura 08. Imagen de un dique.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Chimeneas o cuellos volcánicos: son intrusiones que han dado origen a los conos volcánicos (7 pág. 9).

2.2.4. Propiedades de las discontinuidades

Todas las discontinuidades presentan propiedades geomecánicas importantes que las caracterizan y que influye en el comportamiento de la masa rocosa.



Figura 09. Esquema de las propiedades de las discontinuidades.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Orientación: es la posición de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por su rumbo y buzamiento. Cuando un grupo de discontinuidades se presentan con similar orientación o en otras palabras son aproximadamente paralelas; se dice que éstas forman un “sistema” o una “familia” de discontinuidades (7 pág. 10).

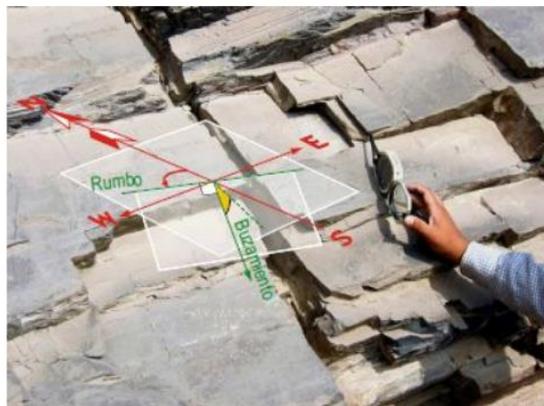


Figura 10. Orientación de las discontinuidades.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Espaciado: es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Éste determina el tamaño de los bloques de roca intacta. Cuanto menos espaciado tengan, los bloques serán más grandes (7 pág. 10).



Figura 11. Espaciado de una discontinuidad.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Persistencia: es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad. Cuanto menor sea la persistencia, la masa rocosa será más estable y cuanto mayor sea ésta, será menos estable (7 pág. 11).



Figura 12. Persistencia de discontinuidades.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Rugosidad: es la aspereza o irregularidad de la superficie de la discontinuidad. Cuanta menor rugosidad tenga una discontinuidad, la masa rocosa será menos competente y cuanto mayor sea ésta, la masa rocosa será más competente (7 pág. 11).

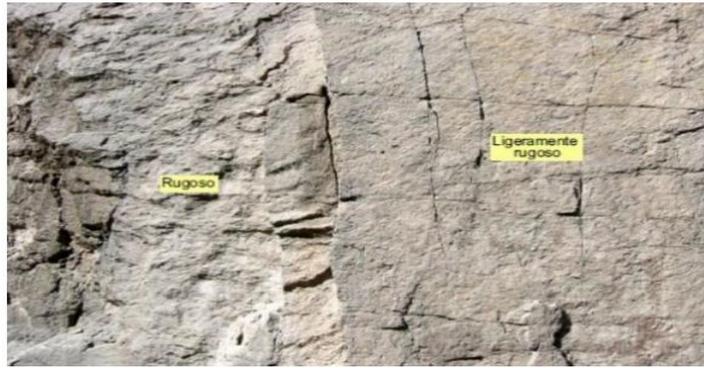


Figura 13. Grado de aspereza de discontinuidades.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Apertura: es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de abierto que esta presenta. A menor apertura, las condiciones de la masa rocosa serán mejores y a mayor apertura, las condiciones serán más desfavorables (7 pág. 12).



Figura 14. Apertura de una discontinuidad.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- Relleno: son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando estos son más duros, ésta es más competente (7 pág. 12).



Figura 15. Relleno de discontinuidades.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

2.2.5. Representación espacial de los sistemas de discontinuidades



Figura 16. Representación espacial de los sistemas de discontinuidades.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

- La meteorización y la alteración: entre los procesos geológicos que más influyen en las condiciones de resistencia de la roca y que están presentes en todos los yacimientos metálicos, hay dos factores importantes, la meteorización y alteración.
 - o Meteorización: denominada también intemperización, está relacionada con la modificación que sufre la superficie de la roca o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos. El grado de la meteorización dependerá de las condiciones climatológicas, morfológicas y la composición de la

masa rocosa. La meteorización se divide en meteorización física, química y biológica (7 pág. 14).

- Meteorización física: como consecuencia de esta, la apertura de las discontinuidades aumenta o puede formarse nuevas fracturas por el relajamiento de la roca.
 - Meteorización química: origina la decoloración de la roca hasta la descomposición de la misma.
 - Meteorización biológica: está regida por la presencia y actividad de los seres vivos.
- Alteración: la alteración de la roca, denominada como alteración hidrotermal, se produce por la ascensión de fluidos o gases magmáticos a altas temperaturas a través de las fracturas o zonas de falla. Éstos afectan a los rellenos de las zonas de falla y sus cajas, originando reemplazamientos y rellenos que modifican las condiciones del macizo rocoso en los cuales se emplazan. Los tipos de alteración, como la silicificación y en menor grado la calcificación, mejoran las características de la masa rocosa, incluyendo las zonas de falla. Otros, como la propilitización, disminuyen levemente las condiciones debido a la presencia de cloritas en las paredes de la fractura. La sericitización y la argilitización son las alteraciones más desfavorables para los macizos rocosos donde se emplazan (7 pág. 15).



Figura 17. Imagen de la masa rocosa meteorizada.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

2.2.6. Clasificaciones geomecánicas de la masa rocosa

- Clasificación de Deere (1987): para ir dando respuesta a las dificultades planteadas por las clasificaciones primitivas utilizadas para estimar entibaciones de túneles, fueron surgiendo otras clasificaciones, como de Deere, que en 1967 propuso un sistema de diseño de sostenimiento basado en el RQD. Este parámetro se obtiene a partir del porcentaje de trozos de testigo mayores de 10 cm recuperado en un sondeo, tal como se muestra en la imagen 18 y permite estimar el grado de fractura del macizo rocoso (8).

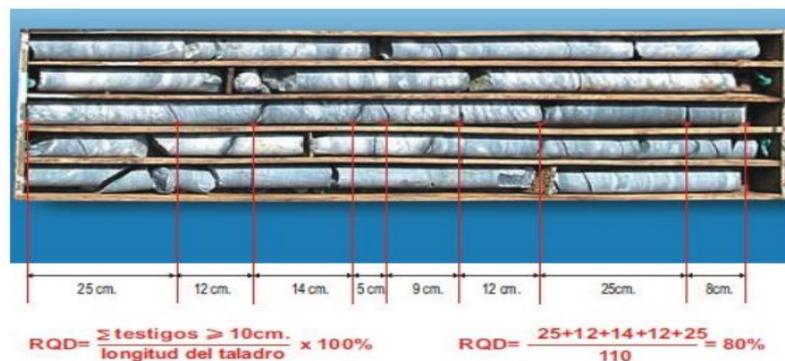


Figura 18. Testigo de perforación diamantina.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (7).

El RQD se debe tomar considerando debidas precauciones, ya que su valor depende no solo de la fracturación del macizo rocoso, sino también de otros factores como la técnica del sondeo, su dirección, diámetro, etc. En ocasiones, se estima el RQD a partir de datos en afloramientos, al no poder disponer de sondeos. En estos casos, se puede utilizar la siguiente relación (Palmstrom), aunque su precisión no es superior a la que puede proporcionar una mera estimación visual (Bieniawski) (8):

$$RQD = 110 - 2.5 J_v$$

Donde:

* J_v : índice volumétrico de juntas o número de juntas por m^3 .

Tabla 01. *Tamaño de bloque.*

Tamaño de bloque	Valores de Jv
Bloques muy grandes	< 1.0
Bloques grandes	1 - 3
Bloques medios	3 - 10
Bloques pequeños	10 - 30
Bloques muy pequeños	> 30

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

Según su RQD, Deere clasificó los macizos rocosos en 6 grupos y propuso distintos sostenimientos en función de la calidad del macizo y del método de excavación utilizado.

- Clasificación de Bieniawski (1973, 1976, 1989): esta clasificación se desarrolló inicialmente a partir de la experiencia en obras realizadas en África del Sur. Su aplicación no presenta muchas limitaciones, excepto en rocas expansivas y fluyentes donde no es aconsejable su uso (8).
 - o Obtención del índice de RMR: para determinar la calidad del macizo rocoso, éste se divide en dominios estructurales, es decir, en zonas delimitadas por discontinuidades geológicas, dentro de los cuales la estructura es prácticamente homogénea. La estructura del macizo comprende al conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. El índice que define la clasificación es el denominado RMR (Rock Mass Rating), que evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los parámetros siguientes (8):
 - Resistencia a compresión simple del material rocoso: en la tabla 02 se presenta una estimación de las resistencias medias de ciertas rocas según Bieniawski.

Tabla 02. *Estimación de las resistencias medias de ciertas robas según Bieniawski.*

Tipo de Roca	Resistencia a la compresión simple (MPa)		
	Mínima	Máxima	Media
Creta	1	2	1.5
Sal	15	29	22
Carbón	13	41	31
Limonita	25	38	32
Esquisto	31	70	43
Pizarra	33	150	70
Lutita	36	172	95
Árnica	40	179	95
Marga	52	152	99
Mármol	60	140	112
Caliza	69	180	121
Dolomía	83	165	127
Andesita	127	138	128
Granito	153	233	188
Gneis	159	256	195
Basalto	168	359	252
Carita	200	304	252
Dolerita	227	319	280
Gabro	290	326	298
Taconita	425	475	450
Sílice	587	683	635

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

- RQD: este parámetro, que se considera de interés para seleccionar el revestimiento de los túneles, se ha definido anteriormente al tratar sobre la clasificación de Deere (8).
- Espaciado de juntas: el término junta se refiere a las discontinuidades estructurales: fallas, diaclasas, planos de estratificación, etc., y su espaciado es la distancia media entre los planos de discontinuidades de cada familia, es decir, de cada conjunto con las mismas características geomecánicas. Entre este parámetro y el anterior existe una relación clara, por lo que, a no ser por razones históricas

asociadas a la abundante información relacionada con el RQD que existía antes de la aparición de las clasificaciones geomecánicas RMR y Q, quizás no habrían incluido el RQD (8). Así también, la resistencia del macizo rocoso se va reduciendo al aumentar el número de juntas, es decir, cuando disminuye los espaciados de cada familia. La resistencia del macizo rocoso se da en función del espaciado de las juntas y de la resistencia a compresión simple del material rocoso. Existen muchas clasificaciones del espaciado de las juntas; la utilizada por Bieniawski es la propuesta por Deere en su clasificación de 1967 que se presenta en la tabla 03.

Tabla 03. *Clasificación de Deere del espaciado de las juntas.*

Descripción	Estacada de las juntas	Tipo de macizo rocoso
May ancho	> 3 m	Solido
Ancho	1 - 3 m	Masiva
Moderadamente corrido	0.3 - 1 m	En blouse
corrido	50 - 300 mm	Fracturada
May corrido	< 50 mm	Machacado

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

- Naturaleza de las juntas: para describir el estado de las juntas se utilizan los siguientes parámetros:
 - Apertura entre los labios de la discontinuidad.
 - Continuidad (dimensiones) de la junta según rumbo y buzamiento.
 - Rugosidad de la junta.
 - Resistencia de la roca a los labios de la discontinuidad.
 - Relleno de la junta.

- Presencia de agua: en un macizo rocoso diaclasado, donde el agua tiene mucha influencia en su comportamiento, debiendo estimarse el flujo de agua en litros/min (l/m) cada

10 m del túnel. La descripción utilizada es la siguiente: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte (8).

- Orientación de las discontinuidades: la orientación de las discontinuidades, respecto al eje de la estructura subterránea, es un factor de suma importancia para determinar el sostenimiento necesario. La correcta orientación de la cavidad puede hacer descender claramente las necesidades de entibación (8). La clasificación dada por Bieniawski, referente a orientaciones relativas entre las discontinuidades y el eje de la cavidad, se presenta en la tabla 04.

Tabla 04. *Orientaciones relativas entre las juntas y el eje de cavidad.*

Rumbo perpendicular al eje del túnel				Rumbo paralelo al eje del túnel		Buzamiento 0 - 20 (independiente del rumbo)
Dirección con el buzamiento		Dirección contra el buzamiento		Buzamiento	Buzamiento	
Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

Después de haber definido los 6 parámetros de la clasificación de Bieniawski, se determinó la categoría del macizo rocoso. Se parte de un denominado “valor primario” de la calidad que es igual a la suma de los cinco primeros parámetros, cuyos valores se definen en la tabla 02. La versión presentada en esta tabla es la de 1989, actualmente en uso. Para diseñar el sostenimiento de un túnel, este valor primario se modifica en función del último parámetro descrito, es decir, orientación de las discontinuidades (tabla 03), obteniendo así el RMR del macizo rocoso. Dependiendo del valor total del RMR, se clasifican los macizos rocosos en cinco categorías (ver tabla 04). En la tabla 05 se muestran,

para túneles, los tiempos durante los cuales se mantienen estables las longitudes sin revestir indicadas. También se presentan las presiones o fricciones estimadas de los macizos rocosos en cada uno de las cinco clases (8).

Tabla 05. *Parámetros de clasificación y sus valores.*

Parámetros		Escala de valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Bajo carga puntual	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para estos valores es preferible la Resistencia a compresión simple		
		A compresión simple	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		Valor	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %		
		valor	20	17	13	8	3		
3	Espacio de las juntas		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
		valor	20	15	10	8	5		
4	Condiciones de las juntas	Muy rugosas sin continuidad cerradas, roca labio sana.	Ligeramente rugosas separaciones <1 mm roca labios ligeramente meteorizada.	Ligeramente rugosas separaciones <1 mm roca labios muy meteorizada.	Espejo de falla de espesor <5 mm, o juntas abiertas 1 - 5 mm juntas continuas	Relleno blando de espesor >5 mm, o juntas abiertas <5 mm juntas continuas			
		Valor	30	25	20	10	0		
5	Agua	Flujo en cada 10m de túnel, o bien	Ninguno	< 10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
		Relación presión de agua en la junta/tensión principal máxima	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Condiciones generales	Completamente seco	Manchas de humedad	May húmedo	goteo	Flujo de agua		
			valor	15	10	7	4	0	

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

Tabla 06. *Ajuste de valores por orientaciones de las juntas.*

Orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Valores	Túneles y minas	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Cimentaciones	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

Tabla 07. *Determinación de la clave del macizo rocoso.*

VALOR TOTAL DEL MRM	80 - 100	64 - 80	41 - 60	21 - 40	< 20
CLASE NÚMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCIÓN	Muy bueno	Bueno	Medio	Malo	May malo

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

Tabla 08. *Significado de la clase de macizos rocosos.*

CLASE NÚMERO	I	II	III	IV	V
TIEMPO DE MANTENIMIENTO	20 años para 15 m	1 año para 10 m	1 semana para 5 m	10 horas para 205 m	30 minutos para un metro
COHESIÓN (KPA)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
ÁNGULO DE FRICCIÓN (GRADOS)	> 45 kPa	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Fuente: González de Vallejo y Ferrer (8).

2.3. Definición de términos

- Agua en las discontinuidades: la presencia de agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes (8).
- Apertura: las discontinuidades pueden ser cerradas, abiertas y rellenas, en dicho sentido se define apertura como la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de roca de una discontinuidad. Las grandes aperturas pueden ser resultado de desplazamientos cortantes de discontinuidades, cuando éstas tienen una rugosidad apreciable, o bien pueden ser debido a tracciones, lavado o disolución. Las aperturas se miden con una regla graduada en milímetros. A gran profundidad, suelen ser inferiores a medio milímetro, en la mayoría de los macizos rocosos, y la forma de medirlas es mediante láminas calibradas. Se deben anotar las aperturas de todas las discontinuidades interceptadas por la línea de toma de datos, cuando se utiliza esta técnica de

observación. Las variaciones de apertura que suelen tener las grandes discontinuidades se suelen medir a lo largo de la traza de las mismas (9).

- Clasificación geomecánica: una parte importante de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas de sostenimiento en túneles. Las mismas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geomecánica de los macizos rocosos, y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel (10).
- Meteorización y alteración de las discontinuidades: el concepto de meteorización engloba en su sentido más amplio a todos aquellos procesos que modifican y cambian las características de las rocas aflorantes. La meteorización de las rocas se refiere a la modificación en la composición o estructura de una roca situada en la superficie terrestre o en sus proximidades, debido a la acción de los agentes atmosféricos (11)
- Pernos de anclaje: los sistemas de reforzamiento con pernos de roca minimizan las deformaciones inducidas por el peso muerto de la roca aflojada, así como también aquellas inducidas por la redistribución de los esfuerzos en la roca circundante a la excavación. En general, el principio de su funcionamiento es estabilizar los bloques rocosos y/o las deformaciones de la superficie de la excavación, restringiendo los desplazamientos relativos de los bloques de roca adyacentes. En los sistemas dominantes de discontinuidades sub horizontales, los pernos ayudan a resistir el desplazamiento relativo entre los estratos, aumentando la rigidez de la viga estructural que forman y creando ligazón entre los bloques tabulares, para minimizar la deflexión del techo. Esto es lo que se llama también el efecto viga. Este concepto puede ser extendido al caso de paredes paralelas a estratos o discontinuidades sub verticales, generando el denominado “efecto columna”, para minimizar el pandeo de los bloques tabulares (7).
- Persistencia (dimensión): o continuidad de un plano de discontinuidad, es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia, pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que

normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente (8).

- Relleno: se denomina relleno de una discontinuidad al material que ocupa el espacio entre sus labios, por ejemplo: calcita, fluorita, limo, etc. Normalmente el espesor de relleno es igual a la distancia perpendicular entre los labios. Es conveniente medir los espesores máximo y mínimo y estimar, a partir de ellos, el espesor medio. Si la diferencia entre los espesores máximo y mínimo es grande, puede ser debido a que la discontinuidad ha experimentado desplazamientos cortantes (9).
- Roca intacta: conocido también como matriz rocosa, “es el bloque ubicado entre las discontinuidades y podría ser representada por una muestra de mano o trozo de testigo que se utiliza para ensayos de laboratorio” (7). Así también, el término roca intacta se refiere también a “un elemento (trozo, bloque, probeta) de roca que no presenta discontinuidades observables” (9).
- Rock Quality Designation (RQD) grado de fracturación del macizo rocoso: indica, el grado de fracturación de un macizo rocoso está relacionada con el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades que afectan al macizo rocoso. La descripción de la fracturación del macizo rocoso puede llevarse a cabo a través del número de discontinuidades que afectan al macizo, del tamaño de los bloques, de la densidad de discontinuidades o del espaciado medio entre discontinuidades. No obstante, el índice de fracturación más empleado en la práctica es el RQD (Rock Quality Designation) (11).
- Rugosidad: el término rugosidad hace referencia tanto a la ondulación de las superficies de la discontinuidad (waviness, ondulación) como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala (roughness, aspereza), presentes en la discontinuidad (12).
- Shotcrete: concreto lanzado (Shotcrete) es el nombre genérico del concreto cuyos materiales componentes son: cemento, agregados, agua, aditivos y elementos de refuerzo, los cuales son aplicados neumáticamente y compactados dinámicamente a alta velocidad sobre una superficie. Adecuadamente aplicado, el Shotcrete es un material de construcción estructuralmente sólido y durable, con buenas características de adhesión con la roca y alta resistencia. Estas propiedades favorables se consiguen con buenas especificaciones y materiales, preparación adecuada de la superficie, buenas prácticas de mezclado, aplicación del Shotcrete y supervisión (7).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método, tipo y nivel de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

El método general de la investigación fue el científico (13), debido que se siguieron pasos ordenados con la finalidad generar nuevos conocimientos a través del estudio de casos para encontrar la solución al problema planteado.

3.1.2. Tipo de la investigación

El tipo de investigación fue aplicada (13), debido a que inicialmente se hizo uso de los conocimientos de las investigaciones básicas para dar solución al problema que se presenta en la unidad minera acerca de la estabilidad de tajeos secundarios.

3.1.3. Nivel de la investigación

El nivel de investigación fue explicativo - correlacional (13), el propósito consistió en explicar y buscar las causas que generan el problema acerca de la estabilidad de tajeos secundarios, y en segunda instancia, fue buscar

la relación que existe entre la variable independiente y la variable dependiente para determinar el tipo de sostenimiento que se deberá instalar en la galería del nivel 0 de la mina artesanal.

3.2. Diseño de la investigación

En la investigación se empleó el diseño cuasi experimental (13), debido que la variable independiente fue manipulada dentro de los parámetros geomecánicos para encontrar el efecto en la variable dependiente que consiste en determinar el tipo de sostenimiento que se deberá instalar en el nivel cero de la mina artesanal.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población estuvo conformada por todas las galerías de la mina artesanal Paucartambo, Pasco.

3.3.2. Muestra

La muestra fue determinada no probabilísticamente (13), escogida por interés de los investigadores, la cual se conformó por el nivel 0 de la mina artesanal Paucartambo Pasco.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

- Observación directa.
- Encuesta personalizada.
- Entrevista.

- Cuestionario.
- Fotografías.

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

- Ficha de observación de campo.
- Ficha de encuesta.
- Entrevista personalizada.
- Cuestionario.
- Panel fotográfico.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.1.1. Descripción de las propiedades físicas del macizo rocoso

- Roca encajonante diorita:

La diorita es una roca ígnea intrusiva o plutónica que se origina por la cristalización lenta del magma bajo la corteza; su composición química es intermedia, es decir, que tiene entre el 52 % al 63 % de sílice (SiO_2). Mineralógicamente se compone de anfíbol, piroxeno, plagioclasas y muy poco cuarzo y feldespato potásico.



Figura 19. Presentación de la diorita.

Fuente: GEOLOGIAWEB (14).



Figura 20. Diorita en lámina delgada.

Fuente: GEOLOGIAWEB (14).

- Diorita en lámina delgada:

Se presenta una muestra de diorita en microscopio en lámina delgada. La diorita está compuesta por hornblenda y plagioclasas principalmente, en lámina delgada se observa la predominancia de estos minerales. En la imagen se observa hornblenda verdosa debido a que se está alterando a clorita, también hay hornblenda marrón. Las plagioclasas en luz natural tienen color blanco, en luz polarizante son grises, se observa que se están alterando a sericita.

- Propiedades y características de la diorita - minerales principales y accesorios:

La diorita se compone principalmente de plagioclasas (un promedio entre oligoclasa y andesina). Las plagioclasas suelen estar zonadas con núcleos de labradorita o bitownita. Cuando tienen feldespatos alcalinos, estos son principalmente ortoclasa. Además, el cuarzo representa un bajo porcentaje (menor al 5 %), es así que si supera este porcentaje la roca se llamaría cuarzo diorita. Los componentes ferromagnesianos (oscuros) principales son hornblenda, biotita y más raramente augita. Con respecto a los minerales accesorios se incluye a la esfena, allanita, apatito, zircón y magnetita.

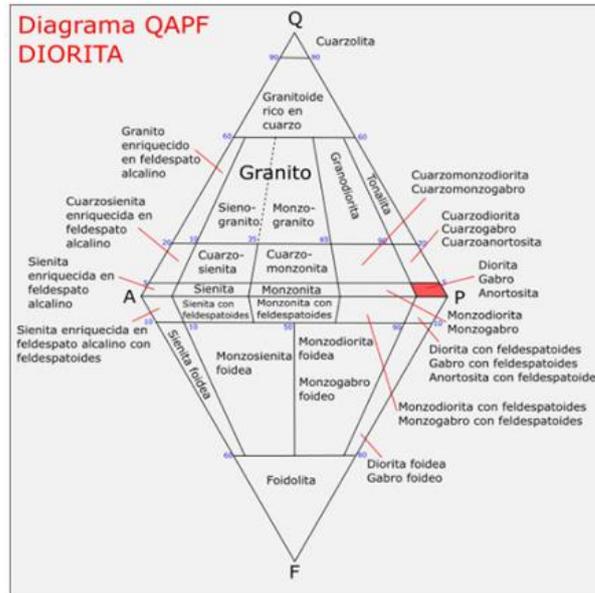


Figura 21. Diagrama QAPF que muestra la composición de la diorita con el porcentaje de cuarzo y feldespatos.

Fuente: GEOLOGIAWEB (14).

- Composición química:

La diorita cristaliza desde un magma o fundido magmático que tiene composición química intermedia. Por lo tanto, su rango de sílice (SiO_2) cae dentro del rango de 52 al 63 %, en promedio estaría entre el 58 %. Con respecto al óxido de aluminio su porcentaje se acerca al 17 % y para el óxido de hierro, ronda en el 3.5 %, el cual puede ser mayor si los minerales ferromagnesianos tienden a dominar en la roca.



Figura 22. Textura de la diorita.

Fuente: GEOLOGIAWEB (14).

Se muestra la textura de la diorita fanerítica de grano medio con plagioclasas idiomorfas y textura orbicular. La diorita tiene principalmente una textura fanerítica que varía de grano fino a medio (entre 2 mm a 5 mm), donde las plagioclasas y hornblendas suelen ser las más desarrolladas. Además, se conoce una variedad que ocurre con una textura orbicular que se conoce como diorita orbicular y es una mezcla de feldespato, hornblenda, biotita (mica negra) y cuarzo.

- Color:

Suele tener tonalidades gris oscuras, pero aparece clara cuando el contenido de plagioclasas y cuarzo están al límite de sobrepasar al campo de cuarzodiorita. El término leucodiorita se emplea cuando aparece con color gris claro. Mientras que el término melanodiorita se emplea cuando los ferromagnesianos son los que dominan en la roca.

- Origen y formación:

Las dioritas suelen estar relacionadas con un ambiente de placas tectónicas activas, es decir con la subducción y la fusión parcial de la loza oceánica y rocas de la corteza continental. Por lo tanto, forman parte de los grandes cinturones montañosos como los Andes sudamericanos. Sin embargo, no suele ser muy común que conformen grandes batolitos, más bien suelen ser cuerpos más pequeños como stocks, que afectan a batolitos granodioríticos, cuarzodioríticos y graníticos. A veces acompañan o son posteriores a eventos de intrusión gabroica (gabros). Las plagioclasas se caracterizan por ser idiomorfas (14).

4.1.2. Datos procesados con el programa Dips 7.0

ID	Dip	Dip Direction	ESPACIADO	PERSISTENCIA	ALTERACION	ABERTURA	RUGOSIDAD	TIPO DE RELLENO	AGUA
1	70°	145°	2	2	2	2	2	2	2
2	78°	150°	1	3	1	2	2	2	2
3	68°	196°	2	3	1	2	2	2	2
4	30°	148°	2	2	1	2	2	2	2
5	55°	132°	3	3	2	2	2	2	2
6	65°	152°	1	2	2	2	2	2	2
7	80°	101°	2	4	3	2	2	2	2
8	64°	156°	2	3	1	2	2	2	2
9	49°	132°	1	3	3	2	2	2	2
10	70°	174°	3	2	2	2	2	2	2
11	72°	165°	4	5	1	2	2	2	2
12	40°	190°	2	3	1	2	2	2	2
13	49°	250°	1	2	1	2	2	2	2
14	83°	189°	5	4	2	2	2	2	2
15	49°	200°	5	3	1	2	2	2	2
16	64°	210°	2	3	1	2	2	2	2
17	82°	136°	3	3	2	2	2	2	2
18	79°	165°	1	4	3	2	2	2	2
19	85°	220°	2	2	2	2	2	2	2
20	54°	174°	3	3	2	2	2	2	2
21	52°	156°	2	2	2	2	2	2	2
22	52°	232°	1	3	3	2	2	2	2
23	52°	148°	2	4	1	2	2	2	2
24	47°	132°	3	3	1	2	2	2	2
25	89°	109°	3	4	1	2	2	2	2
26	80°	110°	1	4	2	2	2	2	2
27	78°	124°	3	4	3	2	2	2	2
28	75°	245°	1	3	1	2	2	2	2
29	80°	120°	1	2	1	2	2	2	2
30	56°	155°	1	3	2	2	2	2	2
31	90°	137°	2	2	1	2	2	2	2
32	54°	210°	4	3	2	2	2	2	2

Figura 23. Cuadro de registro de muestras.

Fuente: elaboración propia.

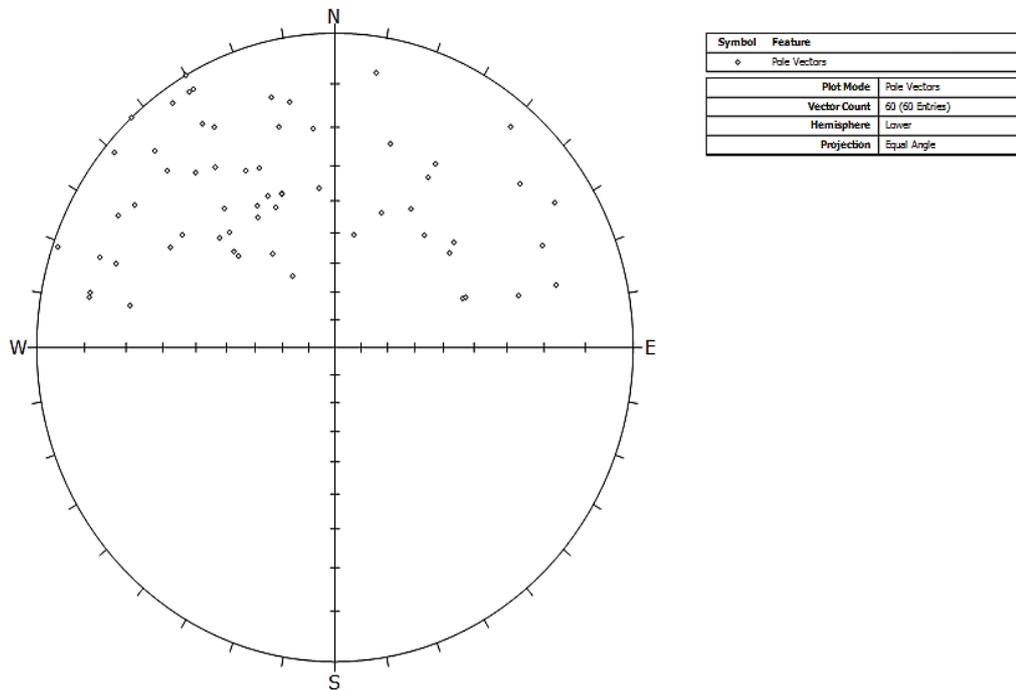


Figura 24. Análisis de la concentración de polos de las discontinuidades en el programa Dips 7.0.

Fuente: elaboración propia.

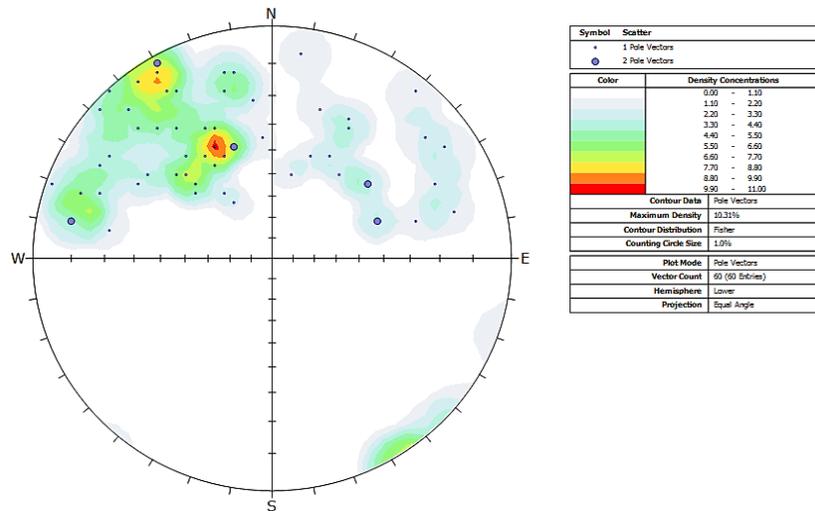


Figura 25. Análisis de la densidad de polos de las discontinuidades en el programa Dips 7.0.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 25 se observa el diagrama de contorno; este resultado es la representación de los polos y las densidades; como se observa, nuestros resultados se asocian a que las densidades están representadas por diferentes colores y la gran acumulación de polos se encuentra en los colores más llamativos como se muestra en la figura 26.

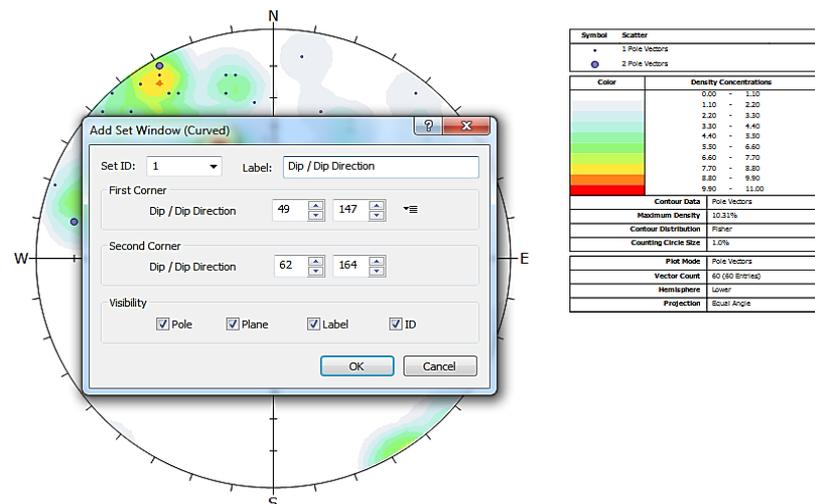


Figura 26. Evaluación de Dip - Dip Direction en el programa Dips 7.0.

Fuente: elaboración propia.

En la anterior figura se observa que el programa Dips 7.0 nos brinda como resultado el Dip = 49° y Dip Direction = 147°; estos resultados contribuyen a determinar la dirección del buzamiento.

4.1.3. Análisis de los parámetros para la clasificación geomecánicas - clasificación geomecánica de Bieniawski - RMR (1989)

Los parámetros de clasificación para obtener el RMR son: resistencia compresiva de la roca intacta, índice de calidad de la roca - RQD, espaciamiento de las discontinuidades y la condición de éstas. Además, se consideró:

- Persistencia o longitud de la discontinuidad.
- Apertura o espacio abierto que presenta una discontinuidad.
- Rugosidad o aspereza del plano de discontinuidad.
- Relleno o material que se encuentra dentro de la discontinuidad.
- Alteración o grado de descomposición de la masa rocosa.
- Condiciones de agua subterránea.
- Corrección por orientación. Estos factores se cuantifican mediante una serie de parámetros, cuya suma, en cada caso nos da el índice de calidad del RMR, que varía de 0 - 100.

a) Evaluación de la resistencia de la roca intacta:

- Carga puntual regular:
 - Resistencia a la compresión uniaxial.
 - Cálculos.
 - El refuerzo de carga puntual (I_s) está dado por:

$$I_s = \left(\frac{P}{De^2} \right)$$

Donde:

*De = es el diámetro equivalente, el cual es igual a: Ensayo diametral ($De^2 = D^2$).

*Ensayo axial o de bloques irregulares: $De^2 = 4 WD/\pi$

Is es una función de De, por lo que se debe aplicar una corrección para obtener un valor único de esfuerzo para una muestra de roca. El valor corregido, denominado Is(50) corresponde al valor de Is medido en un ensayo diametral considerando un diámetro D = 50 mm. La corrección se dio de la siguiente manera:

$$Is = \left(\frac{De}{50}\right)^{0.45} * \left(\frac{P}{De^2}\right)$$

Los resultados de los ensayos diametrales, axiales y de bloques irregulares deben ser calculados separadamente. Finalmente, a partir del índice de carga puntual corregido Is se puede estimar la resistencia a la compresión simple, mediante la fórmula de E. Broch y J. A. Franklin:

$$\sigma_c = K (50)$$

Donde:

*Is(50): índice de carga puntual corregido para un diámetro de muestra de 50 mm (en MPa).

* σ_c : resistencia a la compresión simple estimada a partir del Is(50) (en MPa).

*K: factor de conversión.

- Para determinar la compresión uniaxial se toma como factor de conversión: K = 20.

Tabla 09. *Cálculo de la resistencia de la roca intacta.*

Roca	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga (kN)	De (mm)	Is(50) (Mpa)	σ_c (MPa)
Diorita						
M - 1	30	145	13.03	30	11.50	230.00

M - 2	30	230	13.15	30	11.61	232.20
M - 3	30	180	13.40	30	11.83	236.60
M - 4	30	175	13.41	30	11.84	236.80
M - 5	30	230	13.46	30	11.88	237.60
Promedio					11.73	234.64

Fuente: elaboración propia.

En la anterior tabla se observan los valores del testigo obtenido de la máquina “saca testigos”; la información de éste es muy importante para la realización de los cálculos; el D_e (diámetro de núcleo equivalente) es muy importante en la operación para hallar la carga puntual. Al hallar la carga puntual con la fórmula designada procederemos a hallar la comprensión uniaxial con una fórmula sencilla en la que aplica el factor de conversión.

- Cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial con el martillo Schmidt con los siguientes datos:
 - Muestra 1:

Tabla 10. *Número de rebotes del martillo de Schmidt.*

55	57	56
54	52	56
57	58	53

Fuente: elaboración propia.

En esta tabla 10 se observan los datos sacados de 9 golpes dados con el martillo Schmidt los cuales servirán para hallar el promedio en el siguiente paso.

- El promedio de los datos es de 53.33.
- Muestra 2:

Tabla 11. *Número de rebotes del martillo (225 MPa).*

48	59	60
61	56	57
57	49	53

Fuente: elaboración propia.

Los datos presentados en la tabla anterior corresponden a datos secundarios, en forma de corroboración. De la misma forma, se muestran datos sacados por golpes de martillos Schmidt para ser exactos; éstos se promediarán y del resultado de éstos se promedian nuevamente con el dato promediado de los anteriores golpes.

- El promedio de éstos fue: 55.55.
- El número de rebotes promedio es de 55.
- En cuanto la densidad de la roca es de 2.79.
- El martillo de Schmidt golpeo de forma horizontal.
- El resultado (clasificación) se muestra en la tabla 12.
- RCU = 225 MPa.

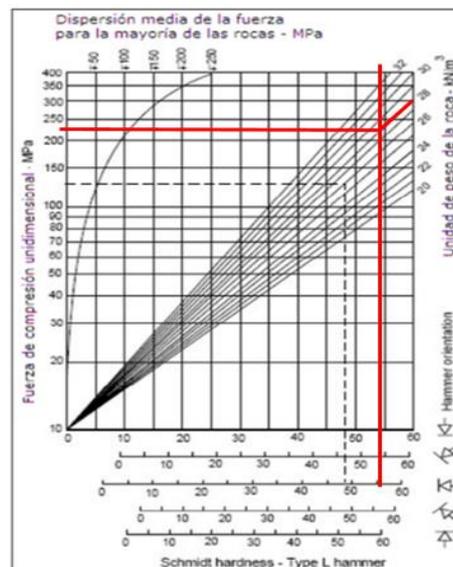


Figura 27. Cálculo *in situ* RCU.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. *Clasificación de las rocas de acuerdo con su resistencia y compresión.*

Resistencia en MPa	Condición	Descripción
5 a 20	Muy débil	Sedimentarias alteradas y débilmente compactadas.
20 a 40	Débil	Sedimentarias y esquistos débilmente cementados.
40 a 80	Resistencia media	Sedimentarias competentes y rocas ígneas cuarzosas de densidad un poco baja.
80 a 160	Resistencia alta	Ígneas competentes, metamórficas y algunas areniscas de grano fino.
160 a 320	Resistencia muy alta	Cuarcitas; rocas ígneas densas de grano fino.

Fuente: elaboración propia, cotejado la Comisión Federal de Electricidad (15).

- b) Evaluación del RQD - Índice de designación de la calidad de la roca (Rock Quality Designation):

$$RQD = 100e^{(-0.1 * \lambda)} * ((0.1 * \lambda) + 1)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ discontinuidades}}{\text{Longitud}}$$

Datos de campo:

*N° de discontinuidades: 60.

*Longitud de muestreo: 18.88 m.

*Cálculo:

$$\lambda = \frac{60}{18.88 \text{ m}} = 3.18$$

$$RQD = 100 * 2.72^{(-0.1 * 3.18)} * ((0.1 * 3.18) + 1)$$

$$RQD = 95.88 \%$$

Tabla 13. Valoración del índice de designación de la calidad de roca (RQD).

RQD %	Calidad de roca
< 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: elaboración propia.

c) Evaluación del espaciado de las discontinuidades:

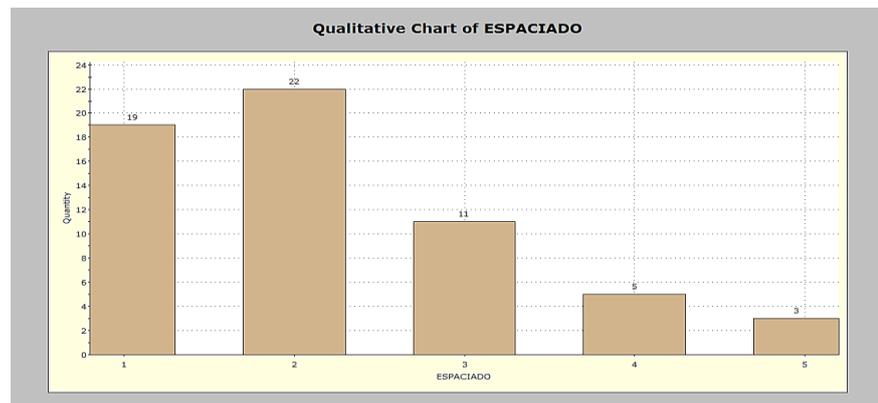


Figura 28. Gráfico que muestra la descripción del espaciamiento.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Valoración del espaciamiento.

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipo de macizo rocoso	Valoración
Muy separadas	> 2 m	Sólido	20
Separadas	0.6 - 2 m	Masivo	15
Moderadamente juntas	200 - 600 mm	En bloques	10
Juntas	60 - 200 mm	Fracturado	8
Muy juntas	< 60 mm	Manchado	5

Fuente: elaboración propia.

En los resultados obtenidos en el “Espaciado” se logra apreciar que encontramos más Espacio Tipo 2 con un total de 22 muestras obtenidas. Según la clasificación del RMR está dado entre 0.6 - 2.0 m, gracias a nuestro mapeo geomecánico.

d) Evaluación de las condiciones de las juntas:

- Persistencia:



Figura 29. Gráfico que muestra la descripción de la continuidad o persistencia.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Valoración de la continuidad o persistencia.

Continuidad	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: elaboración propia.

En los resultados obtenidos en “Persistencia” se logra apreciar que encontramos más Persistencia Tipo 3 con un total de 25 muestras obtenidas. Según la clasificación del RMR está dado entre 3 - 10 m, gracias a nuestro mapeo geomecánico.

- **Abertura:**

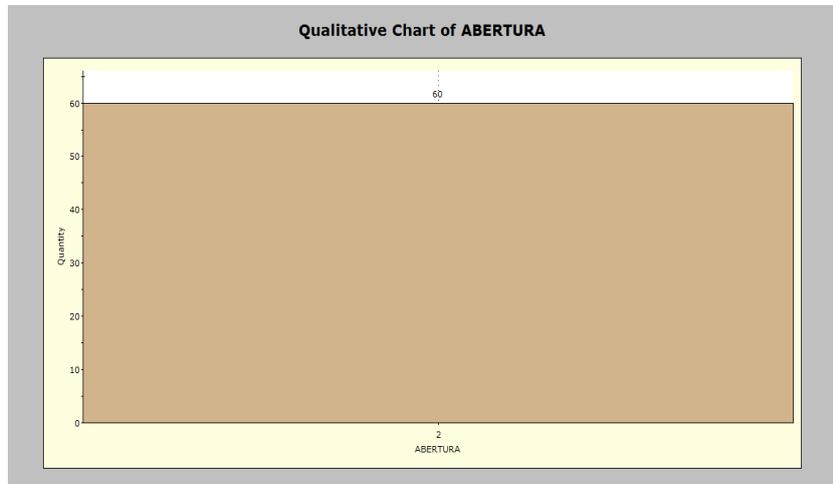


Figura 30. Gráfico que muestra la descripción de la abertura.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. *Valoración de la abertura.*

Abertura	Descripción
< 0.1 mm	Muy cerrada
0.1 - 0.25 mm	Cerrada
0.25 - 0.5 mm	Parcialmente abierta
0.5 - 2.5 mm	Abierta
2.5 - 10 mm	Moderadamente ancha
> 10 mm	Ancha
1 - 10 cm	Muy ancho
10 - 100 cm	Extremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

Fuente: elaboración propia.

En los resultados obtenidos en “Abertura” se logra apreciar que encontramos más Abertura Tipo 2 con un total de 60 muestras obtenidas. Según la clasificación del RMR es una roca Medianamente ancha, gracias a nuestro mapeo geomecánico.

- Rugosidad:

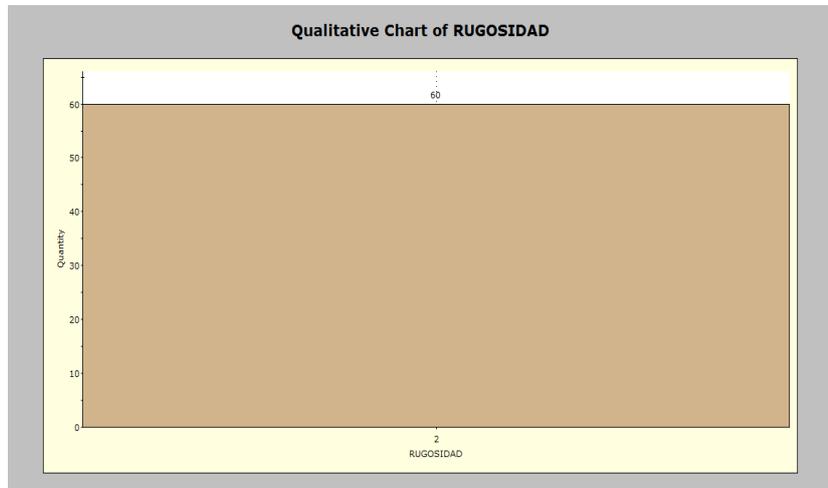


Figura 31. Gráfico que muestra la descripción de la rugosidad.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. *Indicador de peine de Barton.*

Profundidad de peine de Barton	Longitud de muestreo
201	180
223	120
190	180
234	180
251	160

Fuente: elaboración propia.

En la anterior tabla se observan los valores obtenidos al utilizar el peine de Barton; ésta prueba de campo se hace para obtener la rugosidad del macizo. Se logra observar la profundidad obtenida y su longitud de muestreo; en cuanto a la profundidad tomaremos la mayor, además es recomendable usar ésta para tener un resultado más preciso; por otro lado, los datos de longitud de muestreo los sumamos para tener la longitud total que muestreo. Estos datos se emplearon en la representación de la longitud del perfil medio.

Donde:

*La máx. profundidad es de 251 mm.

*Longitud de muestreo total es de 820 mm.

*Conversión a metros sería 8.2 m.

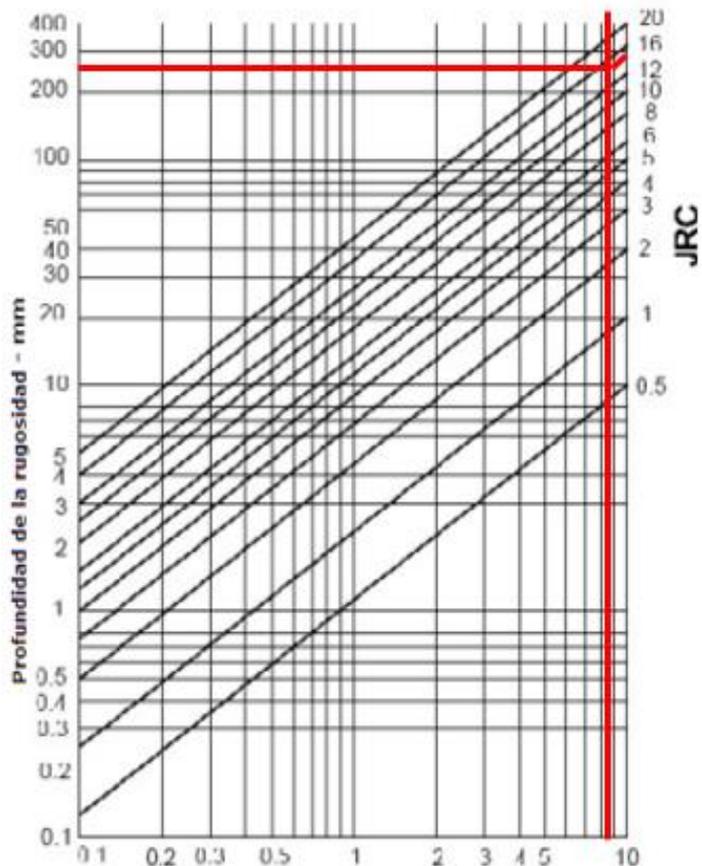


Figura 32. Longitud de muestreo versus profundidad.

Fuente: elaboración propia.

A partir de ello, podemos determinar el JRC que es el dato que medirá el nivel de rugosidad de la discontinuidad; aplicamos los datos de profundidad de la discontinuidad y la longitud total de muestreo para poder obtener el JRC.

- Tenemos un JRC de 14.5.
- Tomamos la tabla de referencia de MRM y JRC para hallar la rugosidad.

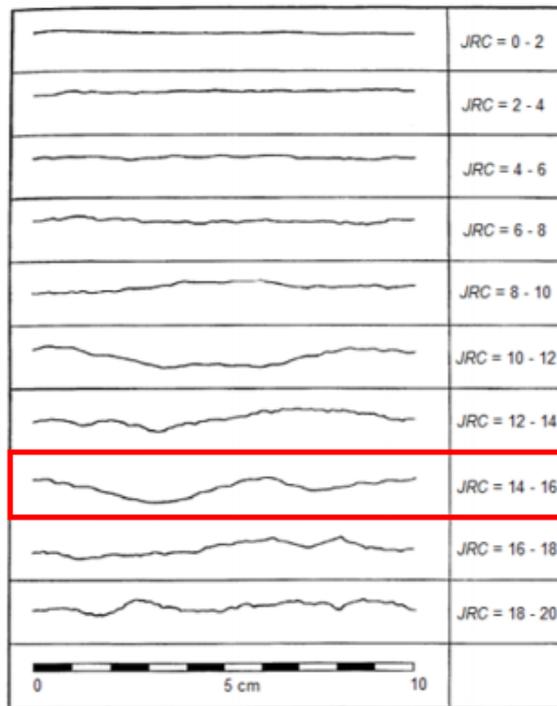


Figura 33. Perfiles típicos de rugosidad.

Fuente: elaboración propia.

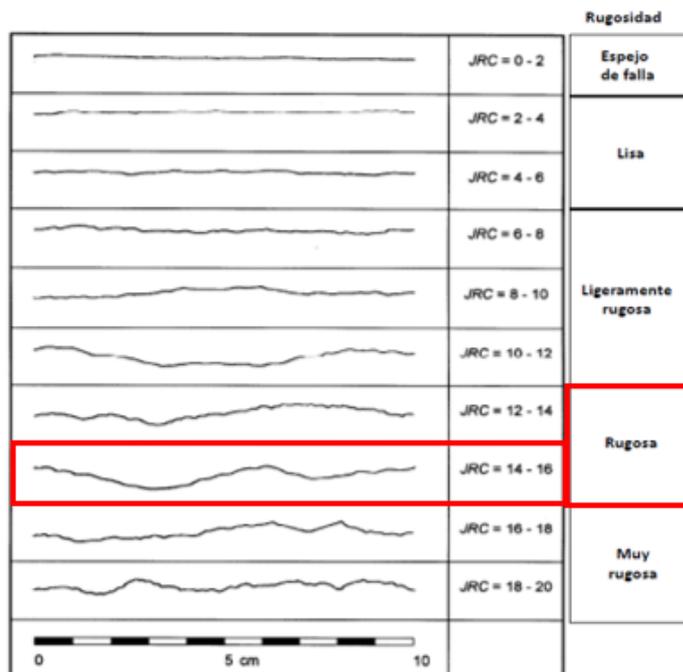


Figura 34. Equivalencia de la rugosidad (JCR y RMR).

Fuente: elaboración propia.

Con el dato del JRC hacemos uso de la tabla de equivalencia de RMR y JRC; con ésta buscamos el valor obtenido para poder tener el nivel de rugosidad de la discontinuidad.

- Así vemos que el JRC está entre el promedio de 14 - 16.
- El tipo de rugosidad es rugosa.

En los resultados obtenidos en “Rugosidad” se puede apreciar que encontramos más Rugosidad Tipo 2 con un total de 60 muestras obtenidas, según la clasificación del RMR.

- Relleno:

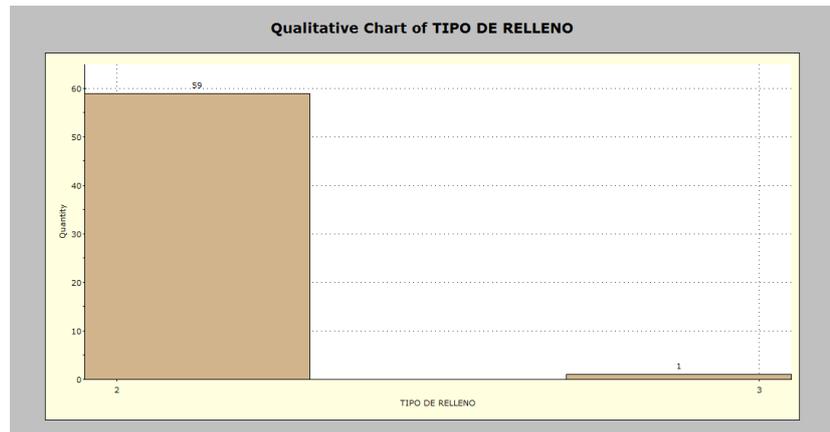


Figura 35. Gráfico que muestra la descripción del tipo de relleno.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18. Valoración del tipo de relleno.

Grado	Descripción	Valoración
1	Blando < 5 mm	0
2	Blando > 5 mm	2
3	Duro < 5 mm	2
4	Duro > 5 mm	4
5	Ninguno	6

Fuente: elaboración propia.

En los resultados obtenidos en “Relleno” se logra apreciar que encontramos más Relleno Tipo 2 con un total de 60 muestras obtenidas; según la clasificación del RMR es una roca Dura < 5 mm, gracias a nuestro mapeo geomecánico.

- Alteración:

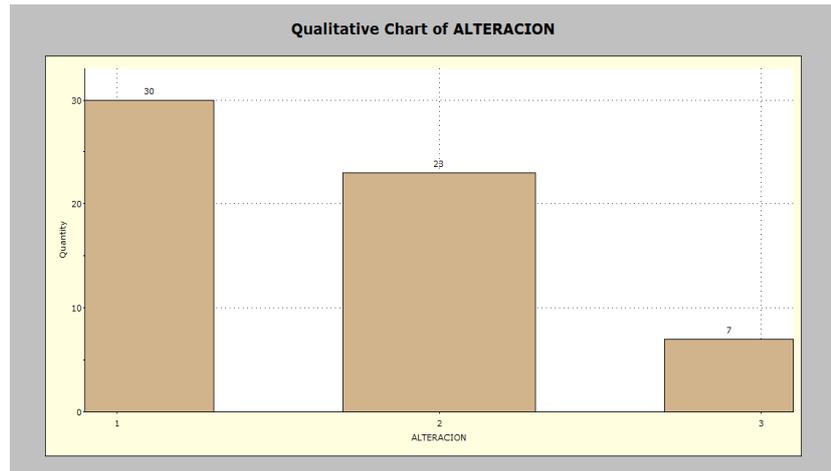


Figura 36. Gráfico que muestra la descripción de la alteración.

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Valoración de la alteración.

Grado	Descripción	Valoración
1	Descompuesta	0
2	Muy alterada	1
3	Moderadamente alterada	5
4	Ligeramente alterada	5
5	No alterada	6

Fuente: elaboración propia.

En los resultados obtenidos en “Alteración” se logra apreciar que encontramos más Alteración Tipo 1 con un total de 30 muestras obtenidas; según la clasificación del RMR es una Roca Sana (no alterada) gracias a nuestro mapeo geomecánico.

e) Evaluación del agua subterránea:

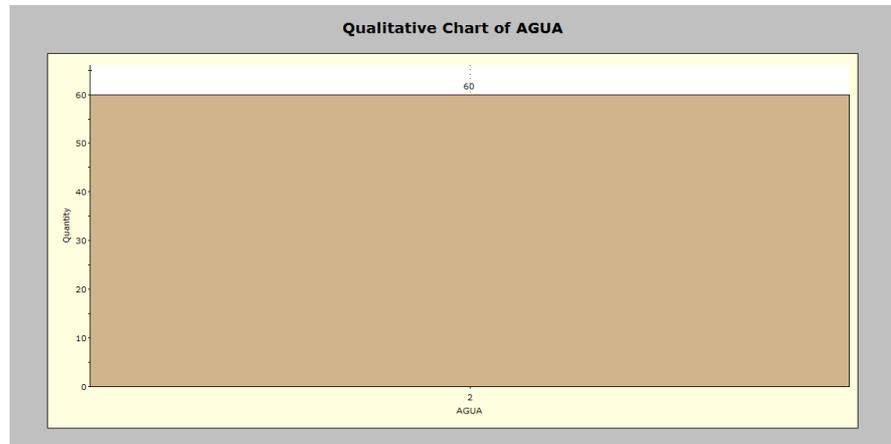


Figura 37. Gráfico que muestra la descripción del agua subterránea.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. Valoración del agua subterránea.

Caudal por 10 m de túnel	Relación presión agua - tensión	Descripción	Valoración
Nulo	0	Seco	15
< 10 l/min	< 0.1	Ligeramente húmedo	10
10 - 25 l/min	0.1 - 0.2	Húmedo	7
25 - 125 l/min	0.2 - 0.5	Goteando	4
> 125 l/min	> 0.5	Fluyendo	0

Fuente: elaboración propia.

En los resultados obtenidos en “Agua subterránea” se logra apreciar que encontramos más Agua subterránea Tipo 1 con un total de 60 muestras obtenidas; según la clasificación del RMR es una Roca Seca, gracias a nuestro mapeo geomecánico.

f) Ajuste por orientación:

- Evaluación de las discontinuidades:

*Rumbo de discontinuidad: N 31° E.

*Buzamiento: 62° E.

*Cálculo:

*Dip Direction de la discontinuidad: 121° .

*Dip: 62° .

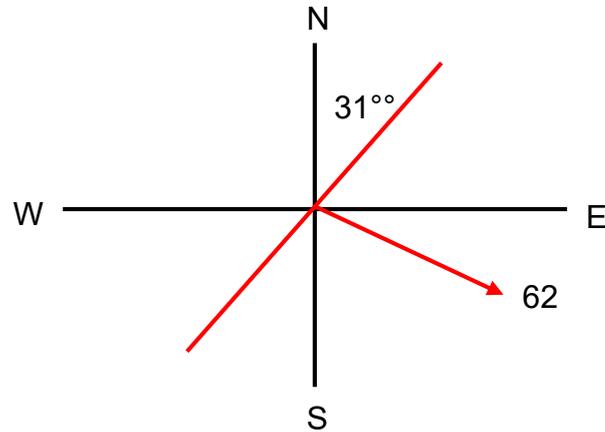


Figura 38. Representación del rumbo de la discontinuidad.

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación del avance de la galería:

*Orientación de la galería:

*Rumbo promedio: N 27° E.

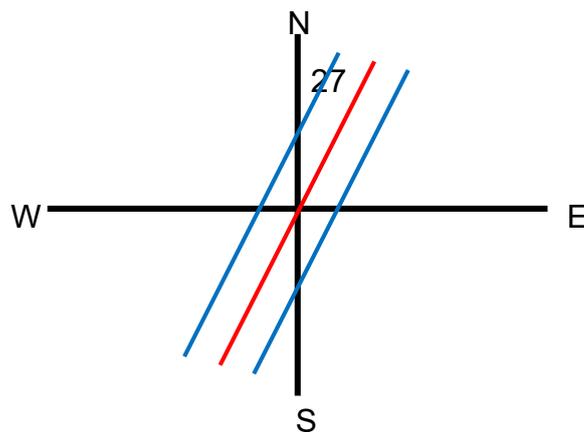


Figura 39. Representación del avance de la galería.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Descripción para la orientación de túneles.

Dirección perpendicular al eje de la obra				Dirección paralela al eje de la obra		Buzamiento 0° - 20° Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz 45° - 90°	Buz 20° - 45°	Buz 45° - 90°	Buz 20° - 45°	Buz 45° - 90°	Buz 20° - 45°	Desfavorable
Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Medio	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 22. Valoración de la orientación de túneles.

Calificativo	Valoración
Muy favorable	0
Favorable	- 2
Medio	- 5
Desfavorable	- 10
Muy desfavorable	- 12

Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Procesamiento de la información software Geo table cartilla RMR

- Datos para el procesamiento:
 - o Resistencia a la compresión simple = 12.
 - o RQD = 20.
 - o Espaciamiento = 15.
 - o Persistencia = 1.
 - o Apertura = 0.
 - o Rugosidad = 5.
 - o Relleno = 4.
 - o Intemperización = 6.
 - o Agua subterránea = 15.
 - o Ajuste por orientación = - 12.
- Software Geo table:



Figura 40. Interface del software Geo table.

Fuente: cotejo propio del software.



Figura 41. Clasificaciones geomecánicas software Geo table.

Fuente: cotejo propio del software.

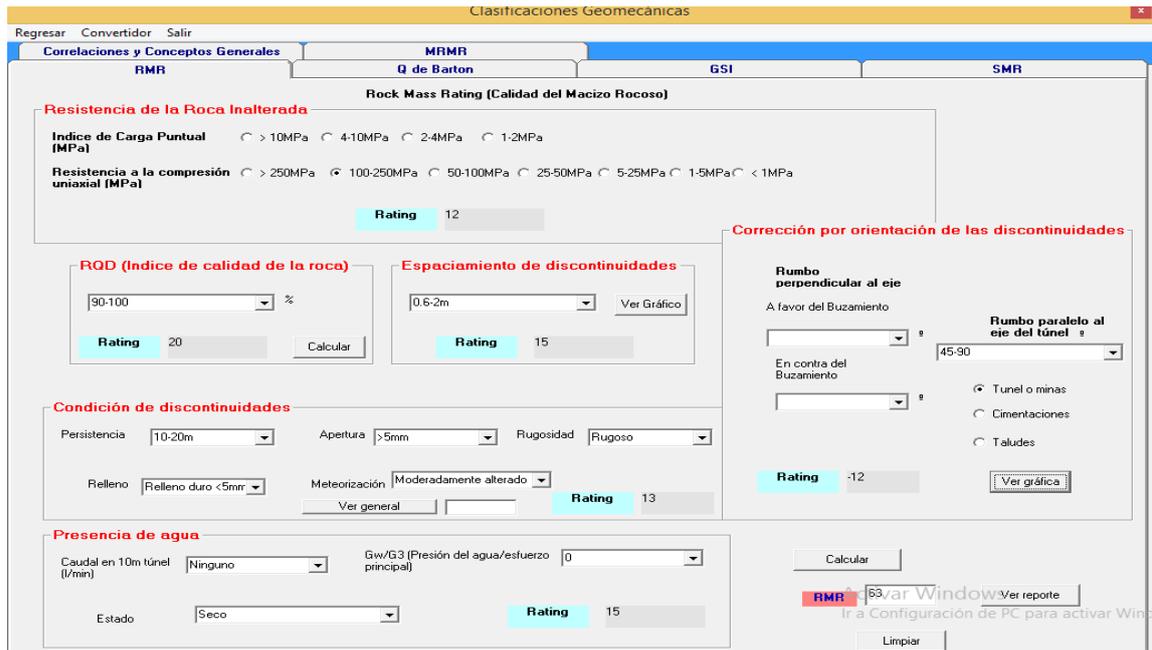


Figura 42. Procesamiento de la información en el software Geo table.

Fuente: cotejo propio del software.

Tipo de macizo rocoso proporcionado por el software Geo table.



Figura 43. Granito, calidad buena, varias familias de discontinuidades alteradas.

Fuente: cotejo propio del software.

Tipo avance proporcionado por el software Geo table.



Figura 44. Rumbo paralelo al eje de excavación.

Fuente: cotejo propio del software.

- Resultados de la evaluación:



Figura 45. Reporte de la evaluación RMR.

Fuente: cotejo propio del software.

- Resultados de la evaluación del autosostenimiento:

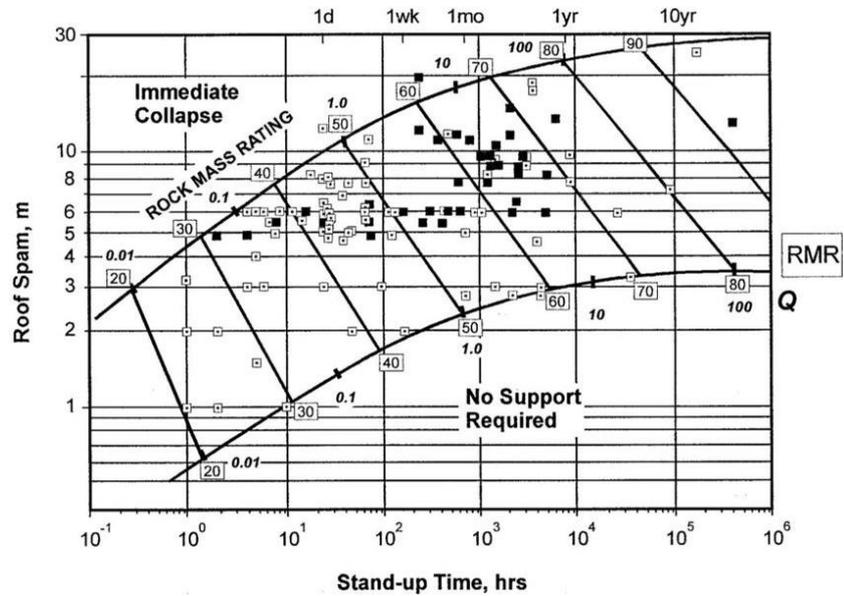


Figura 46. Reporte del autosostenimiento (RMR).

Fuente: cotejo propio del software.

*Roof Spam: 7 m.

*Stand-up Time: 6 meses.

4.1.5. Análisis de costos

- Shotcrete:

Shotcrete de 2"								
Sistema 14 x 7						Equipo:		
PARTIDA :	Shotcrete 2" Via Humeda	Longitud barra:	mt : pie					
Unidad de Medida:	M2	Longitud efectiva:	mt : pie					
TIPO DE ROCA:		No taladros perforados :	Taladros					
DUREZA DE LA ROCA::								
RENDIMIENTO	80 M2 / Gda	Horas por guardia :	10.00	Hr / guardia				
ELABORADO POR :								
PROYECTO	Don Mario							
ITEM	DESCRIPCION	Cantidad	Unidad	% Incid.	Jornal + BBSS	Parcial	Subtotal	TOTAL \$/.
1.00	MANO DE OBRA							
	Maestro lanzador shotcrete	1.00	Tarea	100%	114.58	114.58	1.43	
	Operador de Shotcretera	1.00	Tarea	100%	124.45	124.45	1.56	
	Ayudantes	3.00	Tarea	100%	94.82	284.47	3.56	
	Capataz	1.00	Tarea	10%	203.47	20.35	0.25	
	Jefe de guardia	1.00	Tarea	10%	271.85	27.19	0.34	
	Bodeguero	1.00	Tarea	10%	94.82	9.48	0.12	
		6.63						9.07

DESCRIPCION	Cantidad	Unidad	% Incid.	PU (S/.)	Parcial	Subtotal	
2.00 MATERIALES.							
Manguera de 1" (100 m)	50.00	ml		1.56	-	-	
Manguera de 1/2" (100 m)	50.00	ml		1.00	-	-	
Aceite de perforacion	0.27	gal		41.80	-	-	
3.00 IMPLEMENTOS Y HERRAMIENTAS							
Implementos de Seguridad	6.63	Und	100%	8.68	57.52	0.72	
Herramientas	2.00	%mo	100%	9.07	18.14	0.23	
							0.95
4.00 EQUIPOS							
Shotcretera	10.00	Globa	100%	30.27	302.70	3.78	
Carmix	10.00	H/M	100%	33.00	330.00	4.13	
Scoop 3.5 Yd3	1.40	H/M	100%	224.77	314.67	3.93	11.84
COSTO DIRECTO							21.66
Costos Fijos							3.35
Gastos Genereales							3.62
Utilidad		10.00%					2.19
Imprevistos		0.00%					-
COSTO INDIRECTO							9.16
COSTO TOTAL		S/.	m2				31.01

Figura 47. Cuadro que muestra el costo total de Shotcrete.

Fuente: elaboración propia.

- Perno helicoidal de 7":

Instalación de Perno Helicoidal de 7"				Equipo	Jackleg
Sistema 14 x 7					
PARTIDA :	Sostenimiento con pernos Helicoidal 7	Longitud barra:	2.44	8.00	mt : pie
Unidad de Medida:	Unidad	Longitud efectiv a:	2.23	7.30	mt : pie
		No taladros perforados :	22		Taladros
TIPO DE ROCA:	B				
DUREZA DE LA ROCA::	Dura abrasiva				
N° Pernos / Guardia	22 Unidades	Horas por guardia :	10.00		Hr / guardia
ELABORADO POR :					
PROYECTO	Don Mario				

ITEM	DESCRIPCION	Cantidad	Unidad	% Incid.	Jornal + BBSS	Parcial	Subtotal	TOTAL S/.
1.00 MANO DE OBRA								
Perforista		1.00	Tarea	100%	114.58	114.58	5.21	
Ayudante perforista		1.00	Tarea	100%	100.75	100.75	4.58	
Jefe de guardia		1.00	Tarea	10%	271.85	27.19	1.24	
Capataz		1.00	Tarea	10%	203.47	20.35	0.92	
Bodeguero		1.00	Tarea	10%	94.82	9.48	0.43	
		2.88						15.47
DESCRIPCION								
2.00 MATERIALES.								
Barilla de acero de 8'		13.41	mp	100%	1.09	14.66	0.67	
Barilla de acero de 6'		13.41	mp	100%	0.89	11.98	0.54	
Barilla de acero de 4'		22.46	mp	100%	0.76	17.07	0.78	
Brocas descart. 36 mm		48.95	mp	100%	0.52	25.45	1.16	
Adaptador de Split Set		48.95	mp	100%	0.30	14.77	0.67	
Manguera de 1" (100 m)		50.00	ml	5%	1.56	3.89	0.18	
Manguera de 1/2" (100 m)		50.00	ml	5%	1.00	2.50	0.11	
Aceite de perforacion		0.27	gal	100%	41.80	11.41	0.52	
								4.62
3.00 IMPLEMENTOS Y HERRAMIENTAS								
Implementos de Seguridad		2.88	Und	100%	8.68	24.96	1.13	
Herramientas		1.00	%mo	100%	15.47	15.47	0.70	
								1.84
4.00 EQUIPOS								
Perforadora Jackleg		160.60	pp	100%	0.32	52.03	2.37	
								2.37

COSTO DIRECTO			24.30
Costos Fijos			3.72
Gastos Generales			4.03
Utilidad	10.00%		2.43
Imprevistos	0.00%		-
COSTO INDIRECTO			10.18
COSTO TOTAL	S/.	Unid.	34.48

Figura 48. Cuadro que muestra el costo total acerca del perno helicoidal de 7".

Fuente: elaboración propia.

- Instalación de malla electrosoldada:

Instalación de Malla Electrosoldada				Equipo	Jackleg
Sistema 14 x 7					
PARTIDA :	Instalacion de mallas Electrosaldad	Longitud barra:	2.44	8.00	mt : pie
Unidad de Medida:	Unidad	Longitud efectiva:	2.23	7.30	mt : pie
TIPO DE ROCA:	<input type="text" value="B"/>	No taladros perforados :	9		Taladros
DUREZA DE LA ROCA::	Dura abrasiva				
M2 / Guardia	25.0 M2/Gda	Horas por guardia :	10.00		Hr / guardia
ELABORADO POR :					
PROYECTO	Don Mario				

ITEM	DESCRIPCION	Cantidad	Unidad	% Incid.	Jornal + BBSS	Parcial	Subtotal	TOTAL S/.
1.00	MANO DE OBRA							
	Perforista	1.00	Tarea	100%	114.58	114.58	4.58	
	Ayudante perforista	1.00	Tarea	100%	100.75	100.75	4.03	
	Jefe de guardia	1.00	Tarea	10%	271.85	27.19	1.09	
	Capataz	1.00	Tarea	10%	203.47	20.35	0.81	
	Bodeguero	1.00	Tarea	10%	94.82	9.48	0.38	
		2.88						13.62
	DESCRIPCION	Cantidad	Unidad	% Incid.	PU (S/.)	Parcial	Subtotal	
2.00	MATERIALES.							
	Barilla de acero de 8'	5.49	mp	100%	1.09	6.00	0.24	
	Barilla de acero de 6'	5.49	mp	100%	0.89	4.90	0.20	
	Barilla de acero de 4'	9.19	mp	100%	0.76	6.98	0.28	
	Brocas descart. 38 mm	20.03	mp	100%	0.53	10.68	0.43	
	Adaptador de Split Set	20.03	mp	100%	0.30	6.04	0.24	
	Manguera de 1" (100 m)	50.00	ml	5%	1.56	3.89	0.16	
	Manguera de 1/2" (100 m)	50.00	ml	5%	1.00	2.50	0.10	
	Aceite de perforacion	0.27	gal	100%	41.80	11.41	0.46	
								2.10
3.00	IMPLEMENTOS Y HERRAMIENTAS							
	Implementos de Seguridad	2.88	Und	100%	8.68	24.96	1.00	
	Herramientas	1.00	%mo	100%	13.62	13.62	0.54	
								1.54
4.00	EQUIPOS							
	Perforadora Jackleg	65.70	pp	100%	0.32	21.29	0.85	
								0.85
COSTO DIRECTO								18.11
Costos Fijos								2.77
Gastos Generales								3.00
Utilidad	10.00%							1.81
Imprevistos	0.00%							-
COSTO INDIRECTO								7.58
COSTO TOTAL	S/.	M2						25.69

Figura 49. Representación del costo total de instalación de la malla electrosoldada.

Fuente: elaboración propia.

4.2. Discusión de resultados

H₁: Evaluación de la resistencia roca intacta.

La investigación concluye que la resistencia de la roca intacta analizada en gabinete para carga puntual en promedio es de 11.73 MPa, mientras que para la resistencia de compresión uniaxial es de 234.64 MPa y el resultado *in situ* con el martillo de Schmidt arroja que la fuerza de compresión unidimensional fue de 225 MPa. En dicho sentido, Sosa (1) en su tesis titulada: "Evaluación geomecánica para el diseño de tajeos de producción en la Unidad Minera Cerro Lindo - Compañía Minera Milpo", menciona, en una de sus conclusiones, que la evaluación de la resistencia realizada en campo y en laboratorio se da a partir de la utilización de criterios de falla apropiados, en tal sentido coincidimos con su apreciación.

H₂: Evaluación del índice de designación de calidad de roca.

Nuestra investigación concluye que el índice de designación de la calidad de la roca evaluada por el muestreo lineal arrojó un valor del RQD de 95.88 % lo que lo cataloga como excelente. Cartaya (4) sustentó su tesis titulada: "Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país", en la cual alcanzó en forma de conclusiones las principales características geomecánicas de los macizos rocosos estudiados y se proponen los modelos geomecánicos más representativos para cada caso, en tal sentido, nuestra investigación coincide con la apreciación de realizar evaluaciones geomecánicas con la finalidad de realizar la zonificación apropiada.

H₃: Evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa.

El resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa conformadas por la persistencia, apertura, rugosidad, relleno e intemperización nos arrojó una valoración de 16 puntos. En dicha perspectiva, Cartaya (4) en su tesis titulada: "Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país", estableció en sus conclusiones las principales características geomecánicas de los macizos rocosos estudiados y se proponen los modelos geomecánicos más representativos para cada caso. En tal sentido nuestra investigación coincide con la apreciación de realizar evaluaciones geomecánicas con la finalidad de realizar la zonificación apropiada.

H₄: Evaluación del agua subterránea.

La evaluación del agua subterránea arrojó un valor de 15 puntos lo que lo clasifica como una labor seca, además se tendrá presente que la evaluación se realizó en épocas de estiaje. Cartaya (4) en su tesis titulada: “Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país”, estableció en sus conclusiones las principales características geomecánicas de los macizos rocosos estudiados y se proponen los modelos geomecánicos más representativos para cada caso, en tal sentido, nuestra investigación coincide con la apreciación de realizar evaluaciones geomecánicas con la finalidad de realizar la zonificación apropiada.

H₅: Los parámetros técnicos y económicos permiten establecer el tipo de sistema de fortificación.

La fortificación recomendada consiste en la colocación de pernos localmente de 3 m en la corona espaciados a 2.5 m con malla de alambre ocasionalmente, en el caso del Shotcrete se recomienda 50 mm en la corona donde sea requerido. En dicho sentido, Betancur y López (6) en su tesis titulada “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel veintiuno de la mina La Maruja (distrito minero de Marmato, Caldas) para estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte en la excavación y su correlación con las alteraciones hidrotermales”, establecieron que el sostenimiento que se propuso depende del tipo de estructura, de la calidad de la roca obtenida por la metodología RMR y Q de Barton, el tipo de alteración y por último el tamaño y posición de las cuñas en la excavación. De ambas conclusiones podemos establecer que guardan relación respecto a realizar la evaluación geomecánica para determinar el sistema de sostenimiento.

CONCLUSIONES

- a. La caracterización geomecánica se encuentra en el rango de 61 - 80 puntos que lo describe como roca buena, la cohesión de la masa rocosa KPa 300 - 400, el ángulo de fricción de masa rocosa 35° - 45° y el tiempo de autosostenimiento es de 6 meses con 7 m de Span.
- b. La resistencia de la roca intacta analizada en gabinete para carga puntual en promedio es de 11.73 MPa, para la resistencia compresión uniaxial es de 234.64 MPa y el resultado *in situ* con el martillo de Schmidt la fuerza de compresión unidimensional fue de 225 MPa.
- c. El índice de designación de la calidad de la roca evaluada por el muestreo lineal arrojó un valor del RQD de 95.88 % lo que lo cataloga como excelente.
- d. El resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa conformadas por la persistencia, apertura, rugosidad, relleno e intemperización nos dio una valoración de 16 puntos.
- e. La evaluación del agua subterránea arrojó un valor de 15 puntos lo que lo clasifica como una labor seca se tendrá presente que la evaluación se realizó en épocas de estiaje.
- f. La fortificación recomendada consiste en colocación de pernos localmente de 3 m en la corona espaciados a 2.5 m con malla de alambre ocasionalmente, en el caso del Shotcrete se recomienda 50 mm en la corona donde sea requerido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SOSA, J. *Evaluación geomecánica para el diseño de tajeos de producción en la Unidad Minera Cerro Lindo - Compañía Minera Milpo*. Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2016.
2. LOARTE, O. *Geomecánica para el diseño del sostenimiento de las labores mineras en la Corporación Minera Toma La Mano - Cormitoma S.A. - año 2018*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018.
3. JULCA, J. *Estudio geomecánico y voladura de rocas en nivel 2215 - Mina Candelaria - CMH S.A.C. - 2019*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
4. CARTAYA, M. *Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país*. 3, Cuba: Minería y Geología, 2006, **22**. 0258-8959.
5. RINCÓN, B. *Caracterización geomecánica del macizo rocoso del área del contrato 01-068-96 "Cooperativa Cooprocarrón Sugamuxi" municipio de Gámeza Boyacá*. Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2016.
6. BETANCUR, B. y LÓPEZ, C. *Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel veintiuno de la mina La Maruja (distrito minero de Marmato, Caldas) para estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte en la excavación y su correlación con las alteraciones hidrotermales*. Medellín: EAFIT, 2019.
7. SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA. *Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea*. Lima: Geotecnia, Ingeniería y Opinión, 2004.
8. GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. y FERRER, M. *Ingeniería geológica*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2002.
9. RAMÍREZ, P. y ALEJANO, L. *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
10. PALMSTROM, A. *RMi - a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering*. 2, Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1996, **1**.

11. JORDA, L., y otros. *Manual de estaciones geomecánicas. Descripción de macizos rocosos en afloramientos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
12. VERMA, D., y otros. *A Finite Element Approach of Stability Analysis of Internal Dump Slope in Wardha Valley Coal Field, India, Maharashtra*. 1, India: American Journal of Mining and Metallurgy, 2013, 1.
13. CASTRO, E. *Teoría y práctica de la investigación científica*. Huancayo: s.n., 2016.
14. GEOLOGIAWEB. Diorita. [En línea] 2020. <https://geologiaweb.com/rocas-igneas/diorita/>.
15. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Manual de Diseño de Obras Civiles*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2015.

ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia.

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable
¿Cuál es el valor de la caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021?	Efectuar la valoración de la caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021.	La caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski realizando la evaluación de las propiedades físicas-mecánicas de la roca intacta y macizo rocoso influyen en la propuesta del sistema de fortificación en nivel 0 mina artesanal Paucartambo Pasco 2021.	Variable independiente (X): *Caracterización geomecánica de la masa rocosa.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	
<p>*¿Cuál es el valor de la resistencia de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación?</p> <p>*¿Cuál es el resultado de la evaluación designación de calidad de roca de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación?</p> <p>*¿Cuál es el resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa para la propuesta del sistema de fortificación?</p> <p>*¿Cuál es el resultado de la evaluación del agua subterránea para la propuesta del sistema de fortificación?</p> <p>*¿Cuál son los parámetros técnicos y económicos del sistema de fortificación?</p>	<p>*Determinar el valor de la resistencia de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*Calcular la evaluación de la designación de calidad de roca de la roca intacta para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*Establecer el resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*Estimar el resultado de la evaluación del agua subterránea para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*Especificar los parámetros técnicos y económicos del sistema de fortificación.</p>	<p>*El valor de la resistencia de la roca intacta mediante la prueba de carga puntual tiene relación directa para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*Del valor del parámetro de la designación de calidad de roca de la roca intacta permite medir el grado de fracturamiento que se relaciona con la para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*Establecer el resultado de la evaluación de las condiciones de las juntas de la masa rocosa para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*De la evaluación del agua subterránea se establece el intemperismo que actúa en el macizo rocoso lo cual tiene relación directa para la propuesta del sistema de fortificación.</p> <p>*Los parámetros técnicos y económicos permiten establecer el tipo, costo y vida útil del sistema de fortificación.</p>	

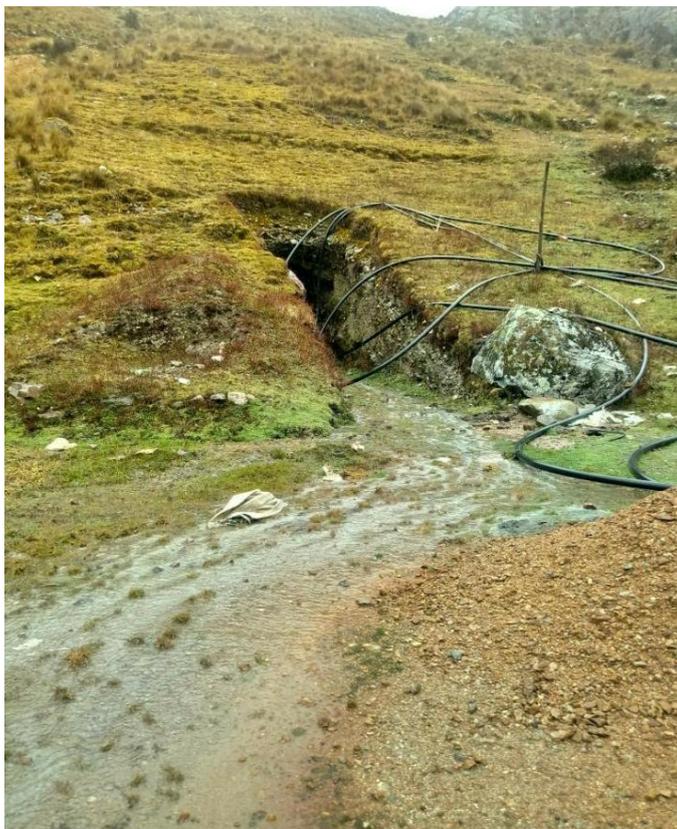
Anexo 02. Operacionalización de las variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional		
		Dimensión	Subdimensión	Indicadores
Variable dependiente (Y): sistema de fortificación.	La caracterización geomecánica permite evitar y/o disminuir los incidentes/accidentes por caída de rocas, utilizando las herramientas, a fin de controlar la estabilidad de rocas, estableciendo tipos de sostenimiento en las diferentes labores mineras y garantizando la estabilidad de la masa rocosa, con el fin de brindar una operación segura y de calidad.	Operación de soporte de rocas.	*Caracterización del macizo rocoso. *Comportamiento del macizo rocoso.	*Resistencia de la roca intacta. *Designación de la calidad de roca. *Condiciones de las juntas de la masa rocosa. *Agua subterránea. *Parámetros técnicos y económicos del sistema de fortificación.

Anexo 03. Datos de campo.

ID	Dip	Dip Direction	ESPACIADO	PERSISTENCIA	ALTERACION	ABERTURA	RUGOSIDAD	TIPO DE RELLENO	AGUA
1	70º	145º	2	2	2	2	2	2	2
2	78º	150º	1	3	1	2	2	2	2
3	68º	196º	2	3	1	2	2	2	2
4	30º	148º	2	2	1	2	2	2	2
5	55º	132º	3	3	2	2	2	2	2
6	65º	152º	1	2	2	2	2	2	2
7	80º	101º	2	4	3	2	2	2	2
8	64º	156º	2	3	1	2	2	2	2
9	49º	132º	1	3	3	2	2	2	2
10	70º	174º	3	2	2	2	2	2	2
11	72º	165º	4	5	1	2	2	2	2
12	40º	190º	2	3	1	2	2	2	2
13	49º	250º	1	2	1	2	2	2	2
14	83º	189º	5	4	2	2	2	2	2
15	49º	200º	5	3	1	2	2	2	2
16	64º	210º	2	3	1	2	2	2	2
17	82º	136º	3	3	2	2	2	2	2
18	79º	165º	1	4	3	2	2	2	2
19	85º	220º	2	2	2	2	2	2	2
20	54º	174º	3	3	2	2	2	2	2
21	52º	156º	2	2	2	2	2	2	2
22	52º	232º	1	3	3	2	2	2	2
23	52º	148º	2	4	1	2	2	2	2
24	47º	132º	3	3	1	2	2	2	2
25	89º	109º	3	4	1	2	2	2	2
26	80º	110º	1	4	2	2	2	2	2
27	78º	124º	3	4	3	2	2	2	2
28	75º	245º	1	3	1	2	2	2	2
29	80º	120º	1	2	1	2	2	2	2
30	56º	155º	1	3	2	2	2	2	2
31	90º	137º	2	2	1	2	2	2	2
32	54º	210º	4	3	2	2	2	2	2

Anexo 04. Ingreso a la mina artesanal Paucartambo.



Anexo 05. Foto grupal en la mina artesanal Paucartambo.

