UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

“Análisis de parámetros técnicos iniciales en la clasificación RMR para uso en fortificación minera”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

MARCOS ADONIS MORALES ESCANDÓN

JOSÉ ANDRÉS VELARDE MORA

Director:

ING. ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA, ECUADOR

2025

Marcos Adonis Morales Escandón

José Andrés Velarde Mora

Trabajo de titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Junio, 2025

“Análisis de parámetros técnicos iniciales en la clasificación RMR para uso en fortificación minera”

DEDICATORIAS:

Desde el fondo de mi corazón dedico mi tesis a dos personas:

Mi adorada madre Melva Escandón, porque ella ha sido un pilar fundamental en mi vida, siempre lucho por darme una educación de calidad, a nunca abandonar, a siempre luchar por un futuro mejor, pero, sobre todo, me hizo entender que la preparación académica es parte fundamental del camino para ser una persona exitosa, además de enseñarme a las buenas y a las malas que este mundo no es de cobardes, gracias madre mía.

Y a mi hermana Malena Morales, ya que ella siempre me ha apoyado, con mucho sacrificio a costeado mis estudios, es la mujer que más admiro en este mundo, la mujer más decidida y más trabajadora que he conocido, incluso cuando no tenía ella me ayudaba, y eso es algo de lo que estaré agradecido eternamente, gracias hermana, este título se lo dedico a ti y a mi madrecita adorada.

Marcos Adonis Morales Escandón

Se lo dedico en especial a mi madre, por su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y por creer en mí, por sus palabras de aliento, por celebrar mis logros y acompañarme en los momentos difíciles, junto a mi familia, que, con su apoyo, su comprensión y su constante compañía, hizo posible que este sueño se materializara.

Esta tesis es para ustedes, quienes siempre fueron mi refugio y mi inspiración.

José Andrés Velarde Mora

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco profundamente a mi padre, Marcos Morales, por haberme apoyado y educado siempre que tuvo la posibilidad, y a toda mi familia en general, por brindarme un respaldo emocional constante. Han sido parte fundamental de mi proceso académico y de mi desarrollo personal.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento al Ing. Patricio Feijoo, por haber aceptado ser nuestro tutor de trabajo de titulación. Su guía y disposición para orientarnos durante el desarrollo del proyecto, así como sus valiosas recomendaciones y sugerencias de mejora, fueron fundamentales. Sobre todo, destaco su calidad humana y su excelencia como educador.

Marcos Adonis Morales Escandón

Agradezco profundamente a todas las personas que me acompañaron y brindaron su apoyo a lo largo de esta etapa académica.

A mi familia, por ser siempre mi refugio y mi motor. Su amor, paciencia y constante aliento han sido fundamentales para superar los desafíos de este camino. Sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a los docentes que marcaron mi formación con su dedicación y vocación, por su guía y orientación durante el desarrollo de todo mi camino, por compartir su conocimiento con generosidad y por motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

José Andrés Velarde Mora

RESUMEN:

El objetivo del presente trabajo consistió en el planteamiento de una metodología para el análisis de calidad de los macizos rocosos, mediante el sistema Rock Mass Rating (RMR) plantado por Bieniawski en 1973, mediante el análisis de los parámetros iniciales, tales como la resistencia a comprensión simple (RCS), Rock Quality Designation (RQD), distancia, orientación y condiciones de las discontinuidades, condiciones hidrológicas, entre otros.

Para conseguir este objetivo se realizó una exhaustiva investigación de dicho sistema y los parámetros que lo conforman, junto a los tipos de fortificación que pueden ser seleccionados según las características del macizo rocoso. Se inició con la estructuración de la propuesta, desde un análisis inicial de los parámetros RCS, RQD y distancia entre fracturas, hasta la elaboración de una matriz para el cálculo del RMR. Los resultados fueron muy interesantes y con alguna variación, la cual debe ser tomada en consideración por los ingenieros en minas.

Palabras clave: Clasificación de Bieniawski**,** RMR, RCS, RQD, diaclasas

ABSTRACT:

The objective of this work was to propose a methodology for the analysis of the quality of rock masses, using the Rock Mass Rating (RMR) system established by Bieniawski in 1973, by analyzing initial parameters, such as simple unconfined compresssive strength (UCS), Rock Quality Designation (RQD), distance, orientation and conditions of discontinuities, hydrological conditions, among others.

To achieve this objective an exhaustive investigation was conducted into this system and its constituent parameters, along with the types of reinforcement that can be selected based on the characteristics of the rock mass. The proposal began with an initial analysis of the USC, RQD, and fracture spacing parameters, and then the development of a matrix for calculating the RMR. The results were very interesting and showed some variation, which mining engineers should take into account.

Key words: Bieniawski classification, RMR, USC, RQD, joints

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIAS: ..... **iii**

AGRADECIMIENTOS: ..... **iv**

RESUMEN: ..... **v**

ABSTRACT: ..... **vi**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **x**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiii**

INTRODUCCIÓN **1**

CAPITULO 1 ..... **2**

MARCO TEORICO **2**

1.1. Macizo rocoso 2

1.2. Principales causas de inestabilidad en macizos rocosos 3

1.2.1. Tipos de fallas 3

1.2.2. Diaclasas 4

1.3. Geomecánica 4

1.4. Clasificaciones geomecánicas 5

1.5. Clasificaciones geomecánicas antiguas 7

1.5.1. Clasificación de Terzaghi 7

1.5.2. Clasificación de Lauffer 9

1.5.3. Clasificación de Deere 11

1.5.4. Clasificación de Bieniawski, Rock Mass Rating (RMR) 12

1.6. Parámetros del RMR 16

1.6.1. Resistencia a la comprensión simple (RCS) 16

1.6.2. RQD (Rock Quality Designation) 17

1.6.3. Espaciado entre discontinuidades 19

1.6.4. Estado de las discontinuidades 20

1.6.5. Condiciones hidrológicas 22

1.6.6. Orientación de las discontinuidades 24

1.7. Fortificación en minería 25

1.8. Pernos de anclaje o bulones 26

1.8.1. Clasificación de pernos 27

1.9. Malla de refuerzo 30

1.10.1 Malla tejida o de biscocho (MT) 31

1.9.2. Malla electrosoldada (MFE) 32

1.10. Arcos de acero 33

1.10.1. Arcos rígidos 35

1.10.2. Arcos deslizantes 35

1.11. Hormigón lanzado 36

CAPITULO 2 42

METODOLOGIA 42

2.1. Selección de parámetros 42

2.2. Evaluación 42

2.2.1. Creación de límites de puntaje 45

2.2.2. Errores de las curvas 48

2.2.3. Corrección de las curvas 50

2.2.4. Errores persistentes 53

2.3. Elaboración de métodos para el cálculo de RMR mínimo y máximo sin medios de cálculo preciso 55

2.3.1. Clasificación por influencia 55

2.3.2. Método de “Influencia media” 63

2.3.3. Método de “Evaluación de categorías”..... 65

CAPITULO 3 72

RESULTADOS 72

3.1. Uso de las curvas de puntaje mínimo y máximo en la clasificación RMR 72

3.2. Resultados de las guías para la clasificación mínima y máxima del RMR sin medios de cálculo preciso 90

CONCLUSIONES 96

RECOMENDACIONES 98

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas para la clasificación de macizos rocosos 7

Tabla 2. Clasificación de Terzaghi 9

Tabla 3. Clasificación de Lauffer 10

Tabla 4. Clasificación de Deere 11

Tabla 5. Valoración del sistema RMR en las distintas versiones 13

Tabla 6. Tipo de soporte en correspondencia al valor de RMR 13

Tabla 7. Parámetros de clasificación y puntajes correspondientes 15

Tabla 8. Correlaciones entre RCS y otros valores geotécnicos 16

Tabla 9. Correlaciones entre RQD y otros valores geotécnicos 19

Tabla 10. Tablas para condiciones entre discontinuidades 22

Tabla 11. Gráfica y puntos, RCS 43

Tabla 12. Gráfica y puntos, RQD 44

Tabla 13. Gráfica y puntos, Distancia entre Diaclasas 44

Tabla 14. Variación RCS 46

Tabla 15. Variación RQD 47

Tabla 16. Variación Distancia entre Diaclasas 47

Tabla 17. Gráfico variación RCS, corregida 52

Tabla 18. Gráfico variación RQD, corregida 52

Tabla 19. Gráfico variación Distancia entre Diaclasas, corregida 53

Tabla 20. Errores persistentes 54

Tabla 21. Rangos de influencia 56

Tabla 22. Rangos de influencia de RCS mediante tabla 57

Tabla 23. Rangos de influencia de RCS mediante recta 58

Tabla 24. Rangos de influencia de RQD mediante tabla 59

Tabla 25 Rangos de influencia de RQD mediante recta 60

Tabla 26. Rangos de influencia de Distancia entre Diaclasas mediante tabla 61

Tabla 27. Rangos de influencia de Distancia entre Diaclasas mediante recta 62

Tabla 28. Rangos de influencia de cada parámetro 63

Tabla 29. Caso de ejemplo 64

Tabla 30. Usa de la tabla “Rangos de influencia de cada parámetro” 64

Tabla 31. Sumatoria de influencia media. 65

Tabla 32. Resultado del caso de ejemplo, para el método de “Influencia media” 65

Tabla 33. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 1 73

Tabla 34. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 2 74

Tabla 35. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 3 75

Tabla 36. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 4 76

Tabla 37. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 5 77

Tabla 38. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 6 78

Tabla 39. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 7 79

Tabla 40. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 8 80

Tabla 41. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 9 81

Tabla 42. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 10 82

Tabla 43. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 11 83

Tabla 44. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 12 84

Tabla 45. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 13 85

Tabla 46. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 14 86

Tabla 47. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 15 87

Tabla 48. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, resumen de resultados 88

Tabla 49. Promedio de variación de RMR Mínimo y Máximo 90

Tabla 50. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo por el método de “Influencia media”, resumen de resultados I..... 91

Tabla 51. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo por el método de “Influencia media”, resumen de resultados II 92

Tabla 52. Resultados del método “Evaluación de categorías” para el RMR Mínimo.... 93

Tabla 53. Resultados del método “Evaluación de categorías” para el RMR Máximo... 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de cálculo según Terzaghi 8

Figura 2. Tiempo de estabilidad de la excavación VS longitud libre..... 10

Figura 3. Proceso para evaluar el valor del RQD de un testigo..... 17

Figura 4. Estimación de Jv de espaciados de juntas y números de familias..... 18

Figura 5. Medición de la dirección de buzamiento. 24

Figura 6. Bulón de anclaje mecánico. 28

Figura 7. Tipos de placas de reparto..... 30

Figura 8. Malla eslabonada o tejida..... 32

Figura 9. Correcta instalación de las mallas. 33

Figura 10. Instalación de cimbras..... 34

Figura 11. Aplicación de revestimiento grueso de hormigón proyectado..... 41

Figura 12. Errores principales, curvas de variación de RCS..... 48

Figura 13. Errores principales, curvas de variación de RQD..... 49

Figura 14. Errores secundarios, curvas de variación de RCS..... 49

Figura 15. Errores secundarios, curvas de variación de RQD..... 50

Figura 16. Errores secundarios, curvas Distancia entre Diaclasas 50

Figura 17. Rangos de influencia de RCS mediante tabla 57

Figura 18. Rangos de influencia de RCS mediante recta 58

Figura 19. Rangos de influencia de RQD mediante tabla 59

Figura 20. Rangos de influencia de RQD mediante recta 60

Figura 21. Rangos de influencia de Distancia entre Diaclasas mediante tabla 61

Figura 22. Rangos de influencia de Distancia entre Diaclasas mediante recta 62

Figura 23. Diagrama de flujo para RMR Máximo por el método “Evaluación de categorías” 70

Figura 24. Diagrama de flujo para RMR Mínimo por el método de “Evaluación de categorías” 71

Figura 25. Resumen de variación de puntaje de los casos analizados..... 88

INTRODUCCIÓN

La industria minera esta categorizada como una actividad de alto riesgo, por ello la seguridad del personal, equipo y maquinaria debe ser fundamental, para asegurar el correcto desempeño de las operaciones de producción.

De este modo, uno de los factores más cruciales, para generar un ambiente seguro dentro de las actividades mineras, es la integridad estructural del macizo rocoso, así reduciendo la posibilidad de accidentes por caída de rocas, deslaves, colapso de galerías, entre otras circunstancias que se pueden dar.

Para esto, se han desarrollado una serie de sistemas de fortificación que permiten mejorar la estabilidad del macizo ante la presencia de características desfavorables, que afecten perjudicialmente la integridad del mismo, como también las instalaciones o equipo existentes, junto a los trabajadores en el área. Como es de suponer cada método de fortificación presentará mejores o peores resultados para determinadas situaciones, además de significar un gasto considerable para el proyecto.

Así diferentes autores, a lo largo del tiempo, han propuesto metodologías que permiten diagnosticar las necesidades de sostenimiento, y por ende seleccionar un método de fortificación adecuado para las peculiaridades únicas que se pueden encontrar. Uno de estos sistemas es el Rock Mass Rating (RMR), el cual permite determinar la calidad de la roca del macizo rocoso y dar un posible sistema para su fortificación.

CAPITULO 1

MARCO TEORICO

1.1. Macizo rocoso

El término "macizo rocoso" se emplea para indicar el conjunto de uno o varios tipos de rocas que atraviesan un plano falla en el que se inserta la mina, pudiendo ser un medio discontinuo, complejo, no obstante, el comportamiento geomecánico debe considerarse como un solo conjunto, y que puede ser estudiado y clasificado en función de su aptitud para distintas aplicaciones, a partir de las clasificaciones geomecánicas (Gonzales de Vallejo, 1983)

Los macizos rocosos tienden a un comportamiento discontinuo, presentado propiedades heterogéneas o anisótropas en el medio natural, dado que están definidos por las rocas y las estructuras que la conforman, adicionalmente se pueden encontrar una serie planos de discontinuidad, que pueden variar entre estratificaciones, fallas, juntas o pliegues, dando lugar a elementos geológico muy complejos y heterogéneos, por lo que se va a requerir una cantidad considerable de investigaciones para describir y definir sus características, además de predecir las interacciones resultantes de las operaciones mineras en el macizo (Oyanguren y Monge, 2004).

Un macizo rocoso está compuesto, en su mayoría, por roca intacta, cuya respuesta bajo condiciones de esfuerzos se puede clasificar si la roca es rígida o blanda.

En el primer caso con una roca de alta resistencia que se ve expuesta a altos esfuerzos (in situ o inducidos) puede provocar el estallido de roca, mientras que una roca suave con una alta capacidad de deformación exhibe comportamiento elastoplástico que le permite tener alta capacidad de deformación que con el tiempo pueden cerrar fracturas en la roca (Aparicio y Velasco, 2017).

1.2. Principales causas de inestabilidad en macizos rocosos

Para Latorre y Contreras (1994) la inestabilidad de un macizo rocoso se puede deber a cuatro elementos principales:

Geología estructural adversa: Habitual en rocas duras con presencia de fallas o discontinuidades excesivamente inclinadas, recomiendan que para evitar una alta alteración por este factor se considere la reubicación o reorientación de la excavación, junto una adecuada fortificación.

Altos esfuerzos en el macizo: Frecuente en excavaciones de gran profundidad o de grandes dimensiones cerca de la superficie, no obstante, ambos casos con la presencia de rocas duras. Las estructuras más afectadas por este tipo de factor son los túneles en regiones montañosas empinadas, ya que generan anormales condiciones de tensión.

Alteraciones por agentes atmosféricos: Las rocas incompetentes son las más afectadas, y muy raramente en roca dura sana. Para evitar variaciones en la roca, se aplican protecciones en la superficie rocosa expuesta, aislándola de la humedad ambiental.

Presencia de aguas: Ya sea a alta presión o de gran caudal, afecta a todo tipo de roca, y puede influir en los factores anteriores, empeorando las condiciones del macizo rocoso sino la presión que ejerce no es controlada por medio de la reorientación de los flujos, comúnmente por cementación.

1.2.1. Tipos de fallas

Las fallas, de modo general, son una fractura la cual se produce un movimiento entre dos bloques rocosos, diferenciándose de las diaclasas al tener un espaciamiento entre los planos, que puede variar de algunos milímetros a cientos de kilómetros (República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía, 2003)

Las fallas se pueden clasificar, según el glosario minero de la República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía (2003), mediante el movimiento resultante entre los bloques en:

- Falla activa: Se tiene la certeza de desplazamiento o movimiento en el pasado geológico reciente, originadas por sismos.
- Falla de cabalgamiento: Ocasiona un movimiento vertical en un ángulo bajo con respecto a la horizontal, causando que el bloque colgante se ubique sobre el bloque yacente.
- Falla de rumbo: Movimiento casi horizontal, a lo largo del plano de falla.
- Falla inversa: Desplazamiento caracterizado por un ángulo mayor a 45°, donde el bloque colgante se halla situado sobre el bloque yacente.
- Falla normal: Similar a la anterior con ángulo igual o mayor de 45°, pero los papeles invertidos ya que el cual el bloque yacente se localiza sobre el bloque colgante.

1.2.2. Diaclasas

Fracturas con una división entre planos no mayor al milímetro, presentes en rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas, se consideran un elemento de gran importancia para la valoración de macizos rocosos, no obstante, se suele simplificar a una variable de un conjunto parámetros, provocando que se consideren como patrones constantes en desarrollo y frecuencia (Ruiz, 2018)

1.3. Geomecánica

De forma general se pude denominar como la ciencia que estudia el comportamiento de las rocas y el suelo, en condiciones naturales o como resultado de

alteraciones por acciones humanas, las cuales pueden culminar en su falla, en respuesta a las variaciones en sus esfuerzos, presión, temperatura u otros parámetros ambientales. De forma más específica en minería la geomecánica se centra en la relación entre esfuerzo y deformación, sin importar si es elástica, plástica o de rotura, para así determinar el grado de calidad de la roca que compone el macizo y como se ve afectada desde la fase de exploración hasta el cierre de la mina (Massaro, 2018).

Según Oyanguren y Monge (2004) entre las caracterizaciones principales que se buscan determinar mediante la geomecánica están los siguientes parámetros:

- Resistencia y comportamiento de la roca.
- Características de las discontinuidades: Continuidad, rugosidad, separación y resistencia de los planos, meteorización y relleno.
- Condiciones hidrológicas.
- Esfuerzos, naturales o inducidas por excavaciones.

Para Cook (2016), la geomecánica durante los últimos 40 años, está tomando un papel más importante en proyectos mineros, puesto que permite comprender cómo diversas labores como serían la perforación para la construcción de galerías, afectan al yacimiento permitiendo al ingeniero a cargo caracterizar y predecir la estabilidad de las labores, mejorando significativamente la planificación del sistema de fortificación, el posicionamiento y la terminación de secciones de la mina, la continuidad de la producción y la minimización de los riesgos, todo esto acorde a las características únicas de cada yacimiento, aumentando los ingresos percibidos.

1.4. Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas surgieron por la necesidad de determinar y evaluar de forma cuantitativa y cualitativa la calidad de los macizos rocosos con el fin

estimar de la forma más precisa la calidad de estos, además de brindar medidas importantes para las labores mineras subterráneas y a cielo abierto, cuyos componentes son estructuras complejas que necesitan una gran planificación en su diseño, construcción, y estabilización (Castro y Pérez, 2013).

Mediante la observación in situ, caracterización del macizo y ensayos sencillos, las clasificaciones geomecánicas permiten designar un índice de calidad al macizo, lo que permiten atribuir un comportamiento y características determinadas, facilitan una rápida y simplificada toma de decisiones a la hora de elegir el sostenimiento para las labores mineras a ejecutar.

Así, las clasificaciones geomecánicas constan de asignar un valor a un determinado grupo de parámetros del macizo rocoso, esta serie de parámetros que pueden varían en cantidad y características analizadas según la metodología empleada. Con todos los datos recopilados se efectúan las relaciones numéricas y fórmulas matemáticas correspondientes, para designar la calidad del macizo dentro de las diferentes categorías que componen cada clasificación geomecánica (Gonzales de Vallejo, 1983).

Si bien las primeras clasificaciones se idearon para trabajos en subterráneo, túneles principalmente, con el paso del tiempo y la implementación de nuevos métodos, poco a poco las obras en superficie, taludes para el caso de minería, se han incluido para su análisis, teniendo la ventaja en este tipo de obras, dado que permiten obtener, parámetros geomecánicos esenciales, como lo son módulo de elasticidad y coeficientes de rotura de Hoek-Brown, de forma más sencilla que en labores subterráneas, mejorando la toma de decisiones en fases iniciales del estudio (Bieniawski, 2003).

Actualmente existe gran variedad de clasificaciones, pero entre las más reconocibles tenemos:

Tabla 1. Sistemas para la clasificación de macizos rocosos

Sistemas existentes de clasificación de macizos rocosos			
Nombre	Autor	Fecha	Comentario
Rock load	Terzaghi	1946	Considerada como la primera clasificación geomecánica
Stand up time	Lauffer	1958	Introdujo nuevos conceptos para evaluar el tiempo de auto sostenimiento de una excavación sin sostenimiento.
Rock Quality Designation	Deere	1964	Al presente es considerada un parámetro más para otras clasificaciones que una clasificación individual.
Rock Mass Rating	Bieniawski	1972	De los sistemas más empleados en la actualidad.
Rock Tunnelling Quality Index	Barton y otros	1974	

Fuente: (Modificado de Pantelidis, L., 2009)

1.5. Clasificaciones geomecánicas antiguas

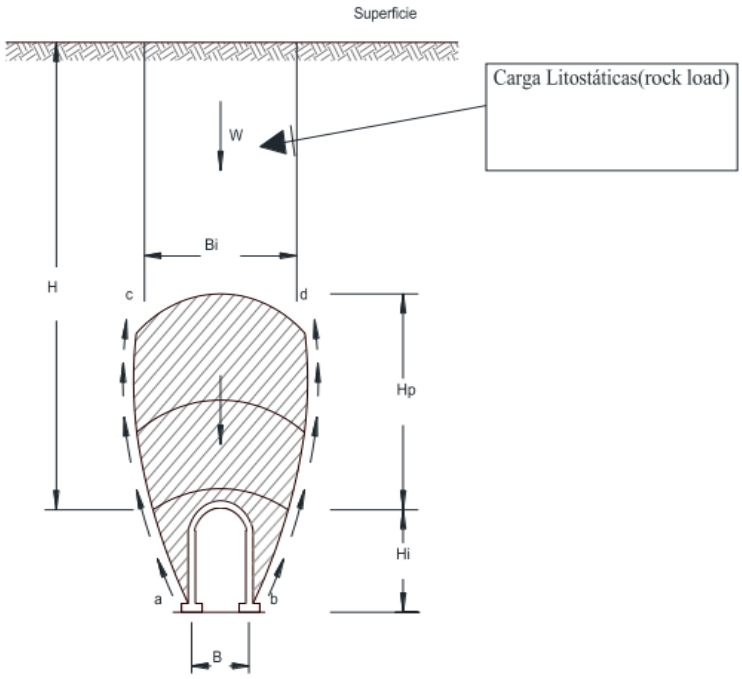
1.5.1. Clasificación de Terzaghi

Para Carrasco et al. (2003) la clasificación del ingeniero civil y geólogo Austriaco Karl Von Terzaghi, postulada en 1946, puede considerarse como la primera clasificación de terrenos, dirigida principalmente a la construcción de túneles utilizando arcos metálicos, mediante métodos clásicos.

Terzaghi establece su clasificación, al considerar los esfuerzos que actúan en un macizo rocoso, planteando que los mencionados esfuerzos dependen de la altura de la

columna de roca sobre la excavación, permitiendo calcular el factor de carga mediante la correlación entre las dimensiones, ancho y largo, de la excavación y las discontinuidades que se encuentren (Torres, 2021).

Figura 1. Esquema de cálculo según Terzaghi



Fuente: (Villamil, 2014)

La teoría de Terzaghi, tiene como objetivo estimar la tensión vertical, que deben soportar los arcos de acero a instalar en un túnel, clasificando el tipo de terreno en diez categorías que sirven para estimar la tensión vertical que soportarían los arcos de acero (Díez y Cedrún, 2022).

Tabla 2. Clasificación de Terzaghi

	Condición de la roca	Carga de Roca H_p	Observaciones
I.	Dura e Intacta	Cero	Revestimiento ligero, requerido sólo si hay lajamientos o estallidos
II.	Dura, estratificada o esquistosa	0 a 0.5 B	Soporte ligero
III.	Masiva, estructuras moderadas	0 a 0.25 B	Carga puede cambiar erráticamente de punto a punto
IV.	Moderadamente blocosa y agrietada	0.25 B a 0.35 $(B+H_t)$	Sin presión lateral
V.	Muy blocosa y agrietada	(0.35 a 1.10) $(B+H_t)$	Pequeña o sin presión lateral
VI.	Completamente triturada pero químicamente intacta	1.10 $(B+H_t)$	Presión lateral considerable. Efecto de reblandecimiento de filtraciones hacia el fondo del túnel requiere soporte continuo para extremos inferiores de las costillas o costillas circulares, cualquiera de las dos.
VII.	Rocas compresivas, profundidad moderada	(1.10 a 2.10) $(B+H_t)$	Alta presión lateral, requiere puntales invertidos. Costillas circulas son recomendadas
VIII.	Rocas de alta presión, gran profundidad	(2.10 a 4.50) $(B+H_t)$	
IX.	Roca expansiva	Hasta 250 pies (80 m) independiente de los valores de $(B+H_t)$	Costillas circulares requeridas. En casos extremos utilizar soporte cedente

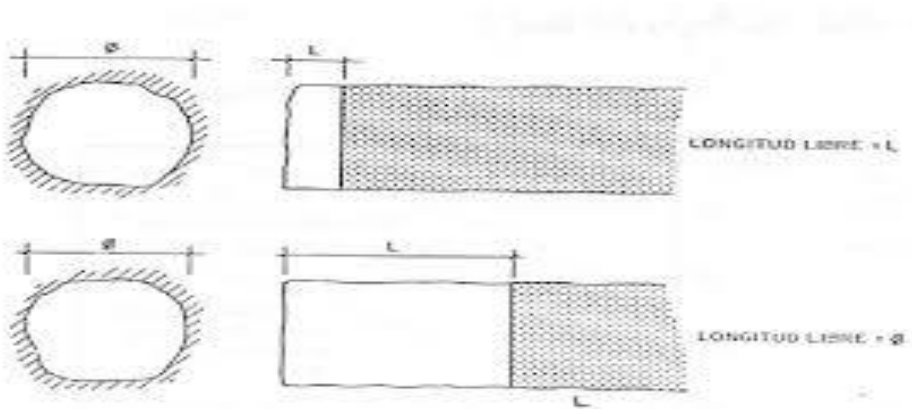
Fuente: (Modificada de White y Proctor, 1946)

Esta clasificación ha caído en desuso, debido a que, al emplear métodos más modernos de fortificación, como el uso de pernos o concreto lanzado, hacen que la clasificación sea poco confiable (Carrasco et al., 2003).

1.5.2. Clasificación de Lauffer

Después de las publicaciones de Terzaghi, Lauffer, en 1958, postula su propia clasificación geomecánica se destaca por la incorporación del concepto de "Tiempo de estabilidad de la excavación", término que indica la luz máxima o largo máximo en la cual una excavación es capaz de sostenerse por sí misma, en función del tiempo, destacándose que la metodología original no tuvo gran relevancia y era poco utilizada en su momento (Carrasco et al., 2003).

Figura 2. Tiempo de estabilidad de la excavación VS longitud libre



Fuente: (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C, 2017)

De carácter cualitativo, esta clasificación da un total de siete categorías, basándose en la experiencia previa de los expertos en turno junto los datos únicos de la propia excavación como la orientación, geometría de la sección, el método de excavación, y el tipo de sostenimiento actual. Es decir que no emplea datos geológicos o geotécnicos, lo que provoca que no cubra eventos como derrumbes, desbastes, rupturas de roca o el fallo de las cuñas en un túnel (Díez y Cedrún, 2022).

Tabla 3. Clasificación de Lauffer

CLASE	TIPO DE ROCA	CALIDAD DEL TERRENO
A	Roca sana	Muy bueno
B	Roca sana, compacta pero fracturada	Bueno
C	Roca fracturada o algo alterada	Medio
D	Roca muy fracturada o alterada o blanda	Mediocre
E	Roca triturada o muy alterada - Roca muy blanda - Terrenos arcillosos	Mala
F	Características análogas a los suelos	Muy mala
G		

Fuente: (Enrique Montalar, 2009)

Entre las revisiones que ha tenido, fue la de Pacher, en 1974, quien añadió una nueva directriz, la cual dicta que a medida que se aumenta el ancho del túnel el "Tiempo de estabilidad de la excavación" disminuye, por lo que un túnel con un ancho pequeño, no presentara dificultades durante su construcción en rocas de calidad regular o mejor, caso contrario para la excavación de galerías de grandes dimensiones de roca de igual calidad (Vargas, 2019).

Un defecto de este método costa de la dificultad de determinar parámetros necesarios para su clasificación, necesitando excavaciones abiertas con distintas longitudes, para la recopilación precisa de datos (Díez y Cedrún, 2022).

1.5.3. Clasificación de Deere

Mediante el Rock Quality Designation (RQD), propuesta por el mismo Deere en 1964, se da una clasificación de un total de 5 categorías para designar la calidad de las rocas. Empleando un análisis que se enfoca en el efecto de las discontinuidades en la calidad del macizo rocoso, mediante la recuperación y evaluación de testigos (Jiménez, 2006).

Posterior mente en 1970, se realizaron una serie de observaciones para mejorar el sostenimiento de túneles basado en dicho factor, junto consideraciones en caso se empleen máquinas tuneladoras (Díez y Cedrún, 2022).

Tabla 4. Clasificación de Deere

RQD	CALIDAD DE LA ROCA
< 25%	Muy pobre
25 - 50%	Pobre
50 - 75%	Aceptable
75 - 90%	Buena
> 90%	Excelente

Fuente: (Enrique Montalar, 2009)

Cabe destacar que el RQD, tiene una serie de falencia, puesto que no refleja plenamente la calidad de la masa rocosa y no considera la fuerza de esta, ya que depende plenamente de la orientación de la línea de muestreo y en casos donde la frecuencia de las fisuras es superior a 3 m es totalmente ineficaz. Adicionalmente no contempla, las características de las juntos como el relleno, así mismo descarta el factor hídrico por presencia de aguas subterráneas o la presión que ejercen (Díez y Cedrún, 2022).

Cabe señalar que en casos especiales donde se encuentran rocas blandas masivas, el RQD calculado se suele aproximar al 100%, indicativo de una roca excelente, pese a que estos macizos rocosos se caracterizan por un comportamiento desfavorable para la elaboración de túneles (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., 2017).

1.5.4. Clasificación de Bieniawski, Rock Mass Rating (RMR)

Originalmente desarrollado por el polaco Bieniawski, Ingeniero geotécnico en 1973, actualmente es una de las clasificaciones geomecánicas más utilizadas junto al índice Q de Barton. A tenido un total de 5 revisiones importantes a lo largo del tiempo, la primera modificación consta de la agrupación de los parámetros de discontinuidad en 1974, lo que redujo el número de parámetros de 8 a 6; en 1975 el valor dado a las discontinuidades paso de positivo a negativo; en 1976 se realizaron variaciones en los límites para la elección del refuerzo; en 1979 se ejecutaron ajustes en los valores de algunos parámetros para hacer el sistema más adaptable; finalmente en 1989 el parámetro de las discontinuidades sub horizontales fue retocado (Gutiérrez et al., 2017). No obstante, cabe destacar que hay modificaciones adicionales, de menor relevancia, indicadas a continuación.

Tabla 5. Valoración del sistema RMR en las distintas versiones

Parámetro	1973	1974	1975	1976	1979	1989
Resistencia de la roca intacta	0 - 10	0 - 10	0 – 15	0 – 15	0 – 15	0 – 15
Rock Quality Designation (RQD)	3 – 16	3 – 20	3 – 20	3 – 20	3 – 20	3 – 20
Espaciado entre juntas (*Js*)	5 – 30	5 – 30	5 – 30	5 – 30	5 – 20	5 – 20
Separación de juntas	1 – 5					
Continuidad de juntas	0 – 5					
Acciones climáticas	1 – 9					
Estados de las juntas (*Jc*)	-	0 – 15	0 – 25	0 – 25	0 – 30	0 – 30
Agua subterránea	2 – 10	2 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15	0 – 15
Corrección por orientación de discontinuidades	3 – 15	3 – 15	0 – (-12)	0 – (-12)	0 – (-12)	0 – (-12)

Fuente: (Gutiérrez et al., 2017)

De igual modo el sistema RMR, como otras clasificaciones geomecánicas, trata de establecer un índice de evaluación que indique la competencia o calidad de un macizo rocoso, al asignarle un valor variable entre 0 a 100, donde un valor alto, generalmente mayor a 60, será indicativo de una buena calidad del macizo, mientras que un valor inferior a 20 enseñaría a una formación pobre donde se necesitara mayores tareas de fortificación (Gutiérrez et al., 2017).

Tabla 6. *Tipo de soporte en correspondencia al valor de RMR*

CLASE	RANGO	SOPORTE		
		Pernos y Malla	Hormigón Lanzado	Marcos de Acero
I	81 - 100	No necesita ademe excepto algunos pernos para refuerzo local	----------	----------
II	61 - 80	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	----------
III	41 - 60	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	----------
IV	21 - 40	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
V	0 - 20	Pernos sistemáticos de 5 a 6 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	150 - 200 mm en el techo, 150 mm en las paredes y 50 mm en el frente	Marcos medianos a pesados espaciados de 0.75 m con estacas y jaula ardilla donde se necesite

Fuente: Modificada de Bieniawski et al. (1989)

Acorde a lo mencionado, el proceso para designar una categoría a un macizo rocoso dentro de la clasificación del RMR, se debe realizar mediante el análisis minucioso de una serie de parámetros, designándoles un valor, dentro de un rango de opciones que se encuentran en tablas ya establecidas, para posteriormente realizar la sumatoria de cada uno, y con el resultado establecer su clasificación. Estos parámetros son:

- Resistencia a la comprensión simple (RCS).
- Rock quality designation (RQD).
- Espaciado entre juntas o discontinuidades (Js).
- Estado de las discontinuidades (Jc).
- Condiciones hidrológicas.

Tabla 7. Parámetros de clasificación y puntajes correspondientes

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 8	8 - 4	4 - 2	1 - 2	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	> 200	100 - 200	50 – 100	25 – 50	10-25	3-10	0-3
	Puntación		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Puntación		**20**	**17**	**13**	**6**	**3**		
3	Distancia entre diaclasas		> 2m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2m	< 0.06 m		
	Puntación		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Condiciones de las diaclasas	Categorías	A	B	C	D	E		
		Características principales	Superficie muy rugosa.	Superficie ligeramente rugosa.	Superficie ligeramente rugosa.	Superficie resbalosa	Superficie resbalosa		
			Sin separación.	Separación < 1mm	Separación < 1mm	Relleno con espesor < 8mm	Relleno con espesor > 5mm o abertura > 5mm		
			Paredes de las diaclasas duras.	Paredes de las diaclasas duras.	Paredes de las diaclasas suaves	Diaclasas continuas	Diaclasas continuas		
	Puntación		**26**	**20**	**12**	**8**	**0**		
5	Condiciones hidrológicas	Categorías	A (1)	B (2)	C (3)	D (4)			
		Caudal de agua en 10m de túnel	0 litros/min	< 25 Litros/min	25 - 125 Litros/min	> 125 Litros/min			
		Fw/Smax	0	0 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5			
		Condiciones Generales	Completamente seco	Húmedo	Presión moderada	Problemas de agua graves			
	Puntación		**10**	**7**	**4**	**0**			

Fuente: (Bieniawski et al., 1989)

Una aclaración, consta que, si bien es uno de los sistemas más empleados actualmente para proyectos mineros, puede llegar a sobreestimar o infravalorar las cualidades de un macizo rocoso dando como resultado una fortificación ineficiente, lo que ocasionaría problemas en el proyecto, al elevar el presupuesto del mismo, por emplear una fortificación excesiva, o caso contrario, accidentes laborales por deslizamiento de rocas, debido a la falta de capacidad del sistema de fortificación, para mantener la estabilidad del macizo. Esto se puede atribuir a que los rangos de las tablas, que ofrecen una opción limitada para el puntaje de las características analizadas

1.6. Parámetros del RMR

1.6.1. Resistencia a la comprensión simple (RCS)

Es un ensayo, en laboratorio de ejecución rápida y bajo costo, que permite clasificar una roca mediante su resistencia a la compresión uniaxial o resistencia a la comprensión simple (RCS), al momento de fracturarse (Vallejo et al., 2002). Esto mediante la siguiente formula:

$$\text{RCS(MPa)}=\frac{Fuerza}{Área}$$

Si el valor resultante es menor a 1 MPa, se suele optar por la prueba de Is (50) o Point Load Tes (Feijoo, 1996)

En el caso de no cortar con el equipo necesario para realizar el cálculo de RCS se puede dar una estimación según el tipo de roca, conforme la siguiente tabla propuesta por el propio Bieniawski, 1973:

Tabla 8. Correlaciones entre RCS y otros valores geotécnicos

Tipo de roca	Resistencia a compresión simple (MPa)		
	Mínima	Máxima	Media
Creta	1	2	1,5
Sal	15	29	22
Carbón	13	41	31
Limolita	25	38	32
Esquisto	31	70	43
Pizarra	33	150	70
Lutita	36	172	95
Arenisca	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
Cuarcita	200	304	252
Dolerita	227	319	280
Gabro	290	326	298
Taconita	425	475	450
Sílice	587	683	635

Fuente: (Bieniawski, 1973)

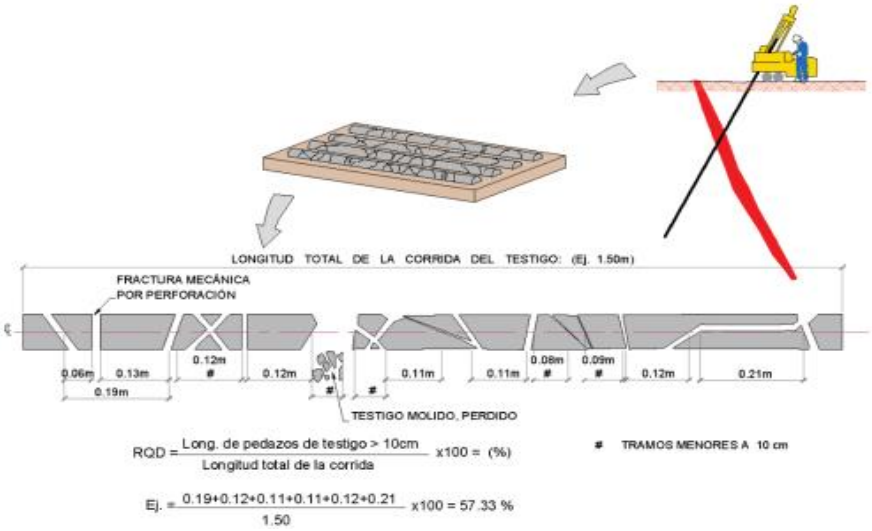
No obstante, se recomienda efectuar los ensayos pertinentes, una vez se tenga el equipo, para evitar errores, en la caracterización del macizo.

1.6.2. RQD (Rock Quality Designation)

Como ya se mencionó, establecido por Deere en 1964, para describir las condiciones de la roca basado en su grado de fracturación. Dentro del RMR se le asigna un valor de 0 (Roca muy pobre) hasta 100 (Roca Excelente), mediante la caracterización de testigos geológicos, dado que permiten comprender las fracturas y grado de alteración de un macizo de forma intuitiva y directa (Deere y Deere, 1988) según la siguiente ecuación:

Figura 3. Proceso para evaluar el valor del RQD de un testigo

$$RQD(\%) = \frac{Longitud\ total\ de\ los\ testigos \geq \mathbf{10cm}}{Longitud\ total\ perforada} * 100$$



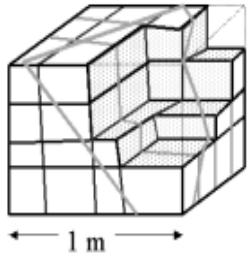
Fuente: (ACG, 2003)

Cabe añadir, que la formula anterior, como indica, es aplicable solo a testigos cuyas dimensiones sean iguales o mayores a 10cm, además de tener un diámetro mínimo de 5 cm. Caso contrario para el cálculo de RQD se definirá por un parámetro Jv, el cual es la cantidad de discontinuidades encontradas en un metro cúbico del material(Feijoo, 1996), utilizando las fórmulas:

Figura 4. Estimación de Jv de espaciados de juntas y números de familias

$$Si\ Jv \geq 4.5 \qquad RQD = 115 - 3.3 * JV$$

$$Si\ Jv \leq 4.5 \qquad RQD = 100\%$$



$J_v = 3 + 3 + 3 + 1 = 10$

Fuente: (Modificado de ACG, 2003)

Para evitar problemas en la caracterización de testigos, por tener distintas extensiones de taladro, se opta por dar mayor importancia al dominio geotécnico, los cuales están bien definidos por su litología.

La obtención de este parámetro suele complicarse en macizos de pésima calidad, dado que el valor resultante es en extremo bajo, y en casos excepcionales, donde las muestras analizadas presentan 35 o más juntas, el RQD será 0%. Por ello, a lo largo del tiempo se han propuesto diversas correlaciones entre variables específicas, para adquirir datos geotécnicos más precisos. Estas relaciones son fundamentadas en el análisis lineal de modelos propuestos y los coeficientes de determinación (R^2) y coeficiente de correlación (R) obtenidos en estas relaciones (Rodrigo et al., 2023).

Tabla 9. Correlaciones entre RQD y otros valores geotécnicos

Correlación	Observación	Autor
$RQD = 110 - 2.5\,Jv$	Correlación entre RQD y recuento volumétrico de diaclasas (*Jv*)	Palmstrom (2005)
$\sigma_{cm}/\sigma_c = 10^{0.013 \cdot RQD - 1.34}$	Estima la resistencia a la compresión no confinada del macizo rocoso a partir de RQD. Los casos cubren diferentes tipos de rocas (granito, diorita, basalto, caliza, andesita)	Zhang (2010)
$K_a = 0.01382 - 0.003 \cdot lnRQD$	Relación entre permeabilidad aparente y RQD. Los casos estudiados abarcan rocas sedimentarias.	Qureshi et al. (2014)
$B_z = 1 - 0.93 \cdot RQD$	Correlación entre el índice de fragmentación modificado y el RQD. Probado en silicalitas de la mina Tongkeng, China.	Chen et al. (2018)
$RQD = 100 - 0.92 \cdot MB_i$	Se evalúa la correlación entre el índice de fragmentación modificado y RQD. Estudiando el macizo de la estación hidroeléctrica Zipingpu, China, sin describir litologías.	Chen et al. (2019)
$RQD = 110.4 - 3.68 \cdot$ çs	Método de predicción para determinar el RQD a partir de la energía especifica de la masa rocosa.	He et al. (2021)

Fuente: (Rodrigo et al., 2023)

Una aclaración poco frecuente para la correcta evaluación del RQD constaría del diámetro del taladro de perforación, pues este factor se ideo para testigos provenientes de taladros de diámetro mayor o igual a 54 mm. Pero la mayoría de testigos utilizados en el cálculo del RQD son de la fase de exploración, generalmente del tipo BQ y NQ (diámetros de 47.6 mm y 50.5 mm respectivamente), esta diferenciación es de importancia ya que testigos de diámetros menores tienden a sufrir mayores fracturas inducidas por el propio proceso de perforación y manipuleo, pero Brown, en 1978, afirmo que los testigos de diámetros BQ y NQ son correctos para la evaluación del RQD, pero se recomienda tener cierta discreción con los datos recopilados.

1.6.3. Espaciado entre discontinuidades

Este factor, propuesto por Deere en 1967, hace referencia al espacio medio entre discontinuidades de una misma familia de fallas presente con dirección perpendicular a estas en un macizo rocoso, generalmente considerado como un parámetro sumamente relevante para la determinar la calidad de un macizo rocoso, dado que influirá en la

estabilidad de extensiones considerables del talud o túnel, ya que, al aumentar la separación entre planos, aumenta la resistencia del macizo (Priest, 1993)

Uno de los métodos utilizados para identificar el espaciado existente entre las discontinuidades se realiza in situ durante las fases iniciales de investigación de la calidad del macizo rocoso (Feijoo, 1996).

1.6.4. Estado de las discontinuidades

Además de la separación entre fallas, se debe considerar su estado, pues sus condiciones pueden afectar la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la roca (Escobar, 2016). Dado esto la clasificación RMR considera la evaluación de cinco elementos principales, para este apartado, los cuales son:

Continuidad: Es la extensión de una discontinuidad medida a lo largo del plano de observación. La medición puede complicarse dado que la continuidad medida en el rumbo puede diferenciarse sustancialmente de la medida resultante del buzamiento, alterando significativamente su categoría.

Rugosidad: El termino rugosidad señala la ondulación e irregularidades a gran o pequeña escala que presenta el macizo. En fases iniciales de un estudio posee una gran importancia, ya que indicaría la resistencia al corte de un plano de discontinuidad, pero a medida que se avanza en el estudio y se identifican la abertura de la discontinuidad y el espesor del relleno, este parámetro pierde relevancia.

Para determinar la rugosidad de un plano, se recure a la intuición y comparación, ya que es un proceso rápido y sencillo de aplicar, pero al ser un método que depende del criterio de cada especialista, se han desarrollo una serie de perfiles para poder tener un mayor conceso en este parámetro.

Relleno: Es un material diferente a la roca que conforma el macizo, comúnmente algún tipo de sedimento constituido principalmente de arcillas, que se localiza entre los planos de discontinuidad, que sirve como relleno.

Una distinción, para evitar confusiones, sucede al tener relleno puesto que la distancia hueca entre los planos pasa a llamarse anchura y no abertura, es decir que, se debe tomar la distancia entre los planos directamente omitiendo el espesor de relleno.

Alteración o meteorización: Influye de manera importante en varias propiedades de la roca, como su resistencia o su permeabilidad, quedando a criterio del experto definir su valor.

Según Escobar (2016) las alteraciones de las discontinuidades pueden clasificarse en tres tipos:

- Genéticas. También llamadas primarias, surgen simultáneamente con la formación geológica, debido a la presencia de estructuras de flujo para rocas ígneas, a la foliación para rocas metamórficas y a la estratificación para rocas sedimentarias.
- Termoquímicas. Originadas por el medio después de formación de la roca por variaciones en el gradiente térmico, infiltración de agua hielo, arcillas o elementos químicos que reacciones como sales.
- Gravitacionales y tectónicas. Igual que las anteriores de origen secundario, ocasionadas por la acción de la gravedad o esfuerzos tectónicos provocados por diaclasas, fallas y estructuras de placas tectónicas.

. Se pueden distinguir dos tablas para este parámetro, la primera usada para investigaciones avanzadas con información precisa, y la segunda, la más común, para las primeras etapas de evaluación, no obstante, las dos son igual de validas.

Tabla 10. Tablas para condiciones entre discontinuidades.

Condiciones de las diaclasas	Longitud discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
	Puntación	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**
	Abertura	Nada (0)	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
	Puntación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
	Puntación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm
	Puntación	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta
	Puntación	**6**	**5**	**4**	**3**	**1**

Condiciones de las diaclasas	A	B	C	D	E
	Superficie muy rugosa.	Superficie ligeramente rugosa.	Superficie ligeramente rugosa.	Superficie resbalosa	Superficie resbalosa
	Sin separación.	Separación < 1mm	Separación < 1mm	Relleno con espesor < 8mm	Relleno con espesor > 5mm o abertura > 5mm
	Paredes de las diaclasas duras.	Paredes de las diaclasas duras.	Paredes de las diaclasas suaves	Diaclasas continuas	Diaclasas continuas
Puntación	**26**	**20**	**12**	**8**	**0**

Fuente: (Modificado de Bieniawski, 1989)

1.6.5. Condiciones hidrológicas

La presencia de aguas subterráneas, debido a la permeabilidad o fallas del macizo, provoca que la resistencia de la roca disminuya en el caso de poros saturados o en discontinuidades reduce la resistencia al corte, en ambos casos se puede se produce meteorización química o física, además de que el agua es un agente erosivo. Normalmente el compartimiento hidrológico depende los esfuerzos tectónicos, acciones endógenas, clima y otros agentes erosivos (Fernandez, 2015).

Dependiendo del diaclasamiento del macizo las condiciones hídricas tendrán diferentes efectos, reconociendo que en macizos rocosos poco diaclasados, las propiedades de fricción y cohesión se ven poco afectadas por la presencia de agua, apenas reduciendo la resistencia de la roca a causa de la presión intersticial. Caso contrario un macizo rocoso diaclasados, donde el agua juego un papel fundamental en su comportamiento (Oyanguren y Monge, 2004).

Cabe destacar que, la influencia del medio hídrico en el macizo rocoso se debe considerar, al influir en la estabilidad, recomendándose hacer una evaluación cualitativa del estado hidrológico (Fernández, 2015).

Dentro del RMR este parámetro se divide en tres elementos:

- Caudal de agua en 10m de túnel: Como se indica se refiere a la cantidad de agua, caudal en litros/minuto, que fluye a través del macizo rocoso en un tramo de 10 metros del túnel. Este valor permite evaluar la influencia del agua en la estabilidad del túnel, considerando que mayores caudales tienden a reducir la calidad geomecánica del terreno.
- Fw/Smax: Razón entre la presión de agua en la masa rocosa (Fw) y la tensión principal máxima del estado de tensión original en la roca. Permite estimar el grado de debilitamiento del macizo por presencia de agua, debido a la acción del agua.
- Condiciones generales: Variable que está basada en el criterio del experto en turno, para describir el ambiente hídrico del macizo. Se sugiere asignar la calificación mínima de 0, a menos que se trate de territorios desérticos, ya que precipitaciones fuertes o recurrentes pueden hacer variar las condiciones del macizo.

1.6.6. Orientación de las discontinuidades

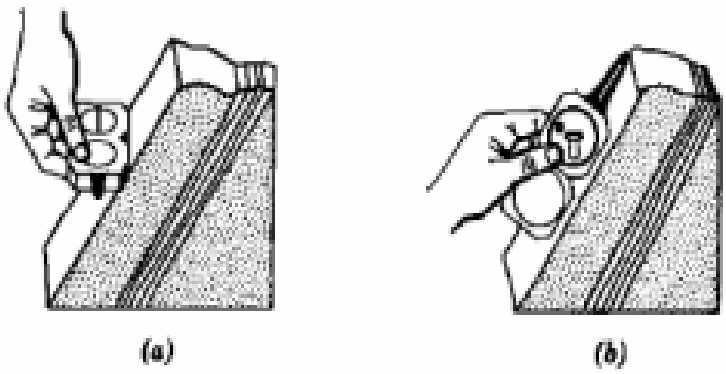
Es un factor de suma importancia para determinar el sostenimiento necesario, pues la orientación de las discontinuidades marca la conducta geomecánica del macizo y la anisotropía del mismo, lo que permite planificar la mejor orientación de la excavación para mejorar las condiciones del sostenimiento y por ende menorando las necesidades de fortificación (Oyanguren y Monge, 2004).

La orientación de una discontinuidad se describe mediante dos parámetros: rumbo y buzamiento.

Rumbo: Considerando un plano horizontal, mide el ángulo formado por una línea imaginaria que representaría la dirección en la cual se extiende una estructura geológica, tomando como punto de referencia al Norte magnético, medido gracias a una brújula.

Buzamiento: Es el ángulo de inclinación, variable entre 0° "Sin inclinación" a 90° "Totalmente vertical", que conformarían la sección de máxima pendiente de una estructura geológica considerando su proyección sobre el plano horizontal. También emplea la brújula como instrumento de medición.

Figura 5. Medición de la dirección de buzamiento.



Fuente: (Aspilcueta et al., 2020)

La brújula puede presentar dificultad para determinar este factor en determinados yacimientos, pues esta tiende a reaccionar de forma anómala en presencia de rocas con

alto contenido en minerales férricos y arrojar datos erróneos que impidan determinar la forma de los bloques de la roca existentes en el macizo rocoso y su comportamiento en caso de desprendimiento (Menéndez, 2009).

1.7. Fortificación en minería

Al ejecutar labores mineras, siempre existe la posibilidad de un colapso de túneles o galerías, caídas material del techo, derrumbe de los taludes, entre otros accidentes, dado que se alteran o generan concentraciones de tensiones en el perfil de las labores, provocando que el macizo, si no es lo suficientemente competente, no sea capaz de soportar este cambio, dando un ambiente de trabajo inseguro. Por esta razón, se han diseñado los sistemas de fortificación con la finalidad de asegurar, controlar y mantener la estabilidad, para brindar condiciones seguras de trabajo (Herbert et al., 2018)

De este modo, las fortificaciones se deben diseñar de manera lógica y determinada para cada macizo en particular. Siendo que, en operaciones mineras de corta vida, deberán ser tan simples como sea posible, siempre y cuando asegure la estabilidad. Caso contrario para proyectos de larga duración, se diseñará fortificaciones de carácter más permanente.

En cualquiera de los casos mencionados, de larga o corta duración, el sistema fortificación empleado debe cumplir con una seria de consideraciones básicas, según Latorre y Contreras (1994), estas son:

- Fortificar el macizo rocoso: El sistema empleado debe permitir que el macizo pueda soportarse por el mismo, evitando crear perturbaciones durante la excavación de la labor, disminuyendo la aparición de fallas o diaclasas a través del tiempo, pues habitualmente la roca natural posee una capacidad de soporte aceptable en ausencia de fracturas.

- Recopilación de información: Se necesita una adecuada recopilación de información, normalmente obtenida de estudios geológicos que demandan una inversión dinero, y en especial de tiempo, recurso no siempre disponible en todas las operaciones mineras.
- Dirección de la excavación: Esta debe estar en armonía con las peculiaridades estructurales del yacimiento y la capacidad de deformación del mismo, además de permitir la instalación de servicios, asegurar espacios suficientemente amplios para las labores requeridas, y permitir planes de expansión para la excavación.

Por ello se han desarrollado diversas metodologías que asocian las características de un macizo, para asignar una calidad a la roca y por consiguiente un tipo de fortificación, que solventen sus necesidades únicas. Permitiendo establecer soluciones rápidas y adecuadas para:

- Retener material: Contener rocas sueltas que puedan desprenderse debido a fracturas en las superficies expuestas.
- Sostener o adherir: Prevenir la aparición o extensión de fallas en la roca por efecto de la gravedad.
- Mejorar condiciones hidrológicas: Reducir la presencia de agentes hídricos, que dificulten las actividades de producción.

1.8. Pernos de anclaje o bulones

Su función es asegurar secciones débiles por presencia de fracturas considerables o rocas sueltas, en el techo y los hastiales de las galerías, instancias donde existe peligro por caída de rocas, esto se logra al estabilizar las deformaciones sueltas de la excavación, al anclar los bloques malos en roca buena, restringiendo su movimiento. No obstante, son

poco recomendados para terrenos muy fracturados, ya que, pierden efectividad con el tiempo.

De manera general, consisten en barras de acero con alta resistencia a la corrosión con formás, y tamaños variables, introducidas en barrenos previamente perforados a lo largo del túnel, de manera ordenada según señalen las necesidades del macizo. Una vez colocados pueden ser o no rellenados conforme las condiciones hídricas indiquen, proporcionando una gran resistencia a la tracción (Herbert et al., 2018).

También pueden suplir otras necesidades como agarradera para servicios de ventilación, drenaje o sistemas eléctricos y sostenimiento para otros métodos de fortificación, como es el caso de mallas y arcos de acero.

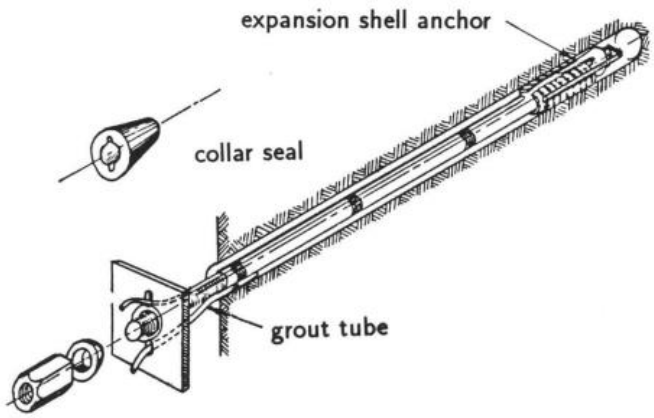
1.8.1. Clasificación de pernos

- Pernos anclados mecánicamente:

Mayoritariamente son pernos de cabeza expansiva, que actúan al introducir el perno en la cuña de la cabeza expansiva, la cual, como señala su nombre, se expande quedando detenida entre las paredes de los barrenos de forma inmediata.

Se destinan para el anclaje de rocas medianamente duras o duras, evitándose en rocas muy duras, ya que estas últimas, por su dureza, impiden un adecuado agarre y con el tiempo resbalan de forma natural o como resultado de vibraciones por tronadura en zonas cercanas. Dependiendo de la duración de las labores se puede rellenar con cemento los barrenos, para que actúen como fortificación permanente (Castillo, 2014).

Figura 6. Bulón de anclaje mecánico.



Fuente: (Hoek & Wood, 1987).

- Pernos anclados por adherencia

Son pernos de hierro o acero con capacidades anticorrosivas, que emplean resina o cemento de fraguado rápido como método de agarre. Por ello, se debe verificar la adherencia de la barra al terreno, dado que, por su coste, son para el soporte a mediano o largo plazo (Castillo, 2014).

Se reconocen los pernos de acero corrugado y de cables, los primeros conformados por elementos esféricos de acero corrugado con diámetros entre 20 a 32 mm, para perforaciones menores a los 6 m de longitudes, se pude emplear tanto resina como cemento como método adherente. El segundo se diferencia, por destinarse a longitudes mayor de 8 m con un requerimiento mayor de capacidad portante, de 25 toneladas, y se prefiere el cemento, sobre la resina, como elemento aglutinador (Laboratorio Oficial J. M. Madariaga, 2015).

- Pernos anclados por fricción:

Se distingue por tener contacto directo entre el bulón y la roca, por lo que se requiere de una perforación precisa, para un correcto anclaje.

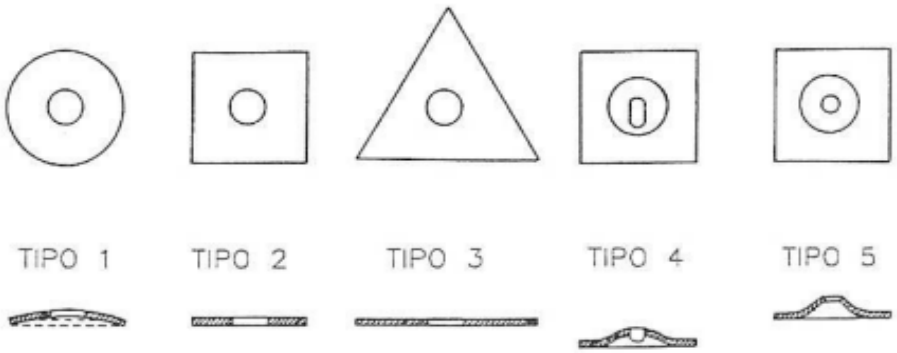
Este tipo de perno emplea la resistencia a la fricción para evitar el deslizamiento entre la superficie del barreno de anclaje y el perno, lo que genera un bloqueado que permite obtener alta resistencia a la tracción, sin embargo, se aconseja un ambiente con baja humedad en caso se desee emplear de forma permanente (Castillo, 2014).

El Laboratorio Oficial J. M. Madariaga (2015) reconoce dos tipos de pernos de fricción, los cuales son:

- Bulones tipo Split Set: También conocidos como pernos de baja carga, están compuestos por un tubo y una placa. El tubo está elaborado por acero de alta resistencia, encontrando en toda su longitud una abertura que permite y facilita su introducción en el taladro, además que al cerrarse dicha abertura y el tubo ejerce una fuerza radial en la roca en el plano de contacto. Son utilizados para el refuerzo temporal en terrenos de calidad regular a mala, siempre y cuando el macizo no presente una intensa fracturación.
- Bulones tipo Swellex: También denominados de alta carga, están formados por un tubo de acero, que una vez introducidos, son hinchados con agua a presión mediante una bomba portátil y una mordaza, logrando un agarre perfecto con las paredes del barreno. Son los más utilizados de forma debido a su rápida aplicación en perforaciones de 6 a 8 metros d longitud.

Un elemento que no es propio de los pernos, pero casi siempre está presente en su instalación son las placas de reparto. La importancia de estas placas radica en apoyar el perno contra la roca, o también otros elementos como la malla dando una sujeción a estos elementos (Castillo, 2014)

Figura 7. Tipos de placas de reparto



Fuente: (Schach et al.,1979*)*

1.9. Malla de refuerzo

Aproximadamente desde la década de los 50, ha sido usada en minería para mejorar las condiciones del macizo rocoso en actividades de minería subterránea y raramente en cielo abierto. Definiéndose de manera sencilla como una malla conformada por alambres de metal, unidos mediante tejido o soldadura, con composición química variable dependiendo del fabricante y las necesidades a cubrir.

Ayudan a retener el material que cae lo largo del túnel, además de evitar la deformación del mismo, por grandes desprendimientos de rocas fragmentadas, en macizos rocosos de baja calidad, también sirviendo como apoyo visual para inspecciones de las galerías al permitir observar zonas donde la malla presente mayor acumulación de rocas desprendidas, requiriendo una reevaluación de la calidad del macizo. Pese a esto, a perdió popularidad, llegando a considerarse como un añadido para el hormigón lanzado (Herbert et al., 2018).

Aparicio y Velasco (2017), mencionan que de manera individual es ineficiente para soportar cargas estáticas o dinámicas. Para mitigar esta falencia se puede usar en conjunto con otros métodos, especialmente, si se piensa emplear para retener rocas

desprendidas a causa de vibraciones, como sería el caso de voladuras, se sugiere su uso junto pernos de anclaje. También se le considera ideal para secciones con movimiento habitual de personal o maquinaria, lugares de reunión y cámaras de chancado al ocupar poco espacio y no interferir en el movimiento.

Independiente del tipo de malla, el proceso normal para su instalación consta de despender todo bloque suelto, enmarcar las paredes de la labor, con todas sus singularidades, para posteriormente fijarlas mediante pernos de anclaje o con shotcrete para servir como un complemento estructural, finalmente. cuando se termine un rollo de malla y se deba instalar uno nuevo se debe traslapar las bordes de estas.

1.10.1 Malla tejida o de biscocho (MT)

Consiste en un tejido de alambres de forma espiral de acero que forman espacios similares a rombos, generalmente poseen un galvanizado superior al promedio como protección ante la corrosión, poseen un alto límite elástico, junto una elevada capacidad para absorber energía, estas dos últimas cualidades la dotan de una alta resistencia al abultamiento, pero a su vez son más susceptibles a la deformación.

Los radios de las aberturas, toman especial relevancia al diseñar el soporte para la malla, ya que una inadecuada distribución reduciría los niveles de deformación en la malla, disminuyendo la capacidad de absorción de energía, también puede darse el caso contrario, con una sobre flexibilidad, que originaria problemas similares (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía Perú, 2004).

Dentro del ámbito minero, gracias a su flexibilidad se utiliza para contener fragmentos sueltos del techo o hastiales de un túnel, resultado de movimientos sísmicos, activaciones estructurales o cualquier suceso que provoque vibraciones en las

instalaciones. Se debe aclarar que, esta malla no es recomendable en la aplicación de concreto lanzado, ya que su forma dificulta el paso de la mezcla.

Figura 8. Malla eslabonada o tejida.

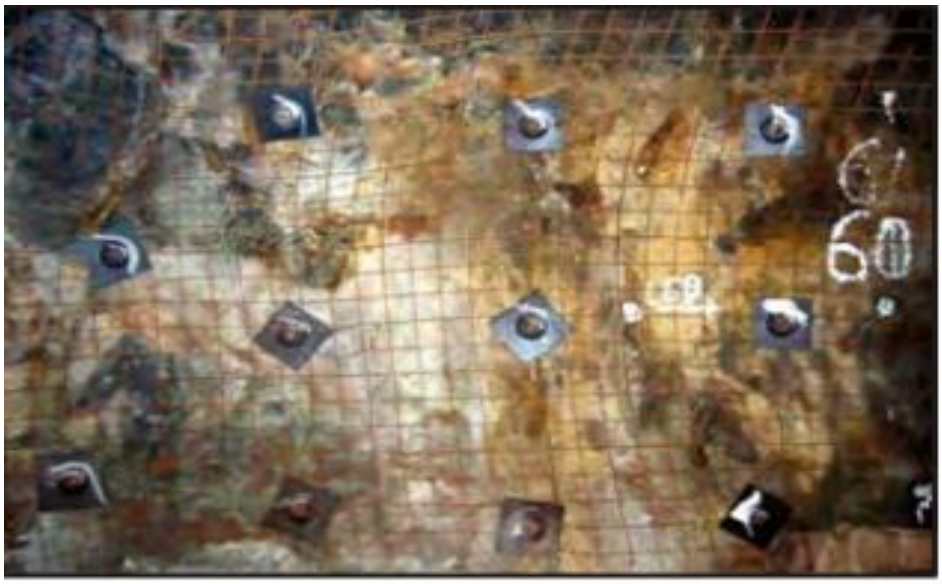
Fuente: **(***Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) Perú, 2004***)**

1.9.2. Malla electrosoldada (MFE)

Constituida por una cuadricula de barras de acero lisas o corrugadas, elaboradas con acero alto en carbono, galvanizado o acero inoxidable, estas son colocadas perpendiculares entre sí, dejando cavidades rectangulares, que se sueldan en sus intersecciones con las dimensiones deseadas. Esto permite una mejor distribución de los esfuerzos, sin embargo, posee una menor resistencia al abultamiento que la malla tejida, al ser más rígida en comparación, por las uniones soldadas que dificultan su deformación.

Son las más usadas en la minería. pese a su menor capacidades de abultamiento, debido a su bajo coste, rápida instalación, y ser la recomendada para servir como refuerzo del concreto lanzado (shotcrete). Aparte de este añadido su función es la misma que la malla tejida, es decir contener rocas desprendidas a causa de vibraciones junto a pernos (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía Perú, 2004).

Figura 9. Correcta instalación de las mallas.



Fuente: **(***Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) Perú, 2004***)**

1.10. Arcos de acero

Según Ponce (2021) es un sostenimiento pasivo permanente utilizado en labores de avance como elemento accesorio para mejorar el sostenimiento de los túneles, puesto que se adaptan a casi cualquier contorno de la excavación, evitando deformaciones en la sección al mantener contacto con la superficie de la roca. Se emplean en condiciones de masa rocosa intensamente fracturada, es decir de calidad “Mala” a “Muy mala”, que se encuentra sometida a altos esfuerzos.

Consta de tramos rectos y curvos que se acoplan en segmentos para facilitar su instalación eh ingreso a la mina. El acoplamiento puede ser mediante tornillos, que permiten su desmantelamiento para ser reutilizados cuando la sección ya no necesite soporte por abandono y se las requiera en otra zona, pero ocasionalmente son soldadas para secciones más longevas.

Adicionalmente, se pueden añadir una serie de elementos para mejorar el refuerzo de los arcos, iniciando con los tirantes, que consisten en varillas de fierro corrugado o liso, cuya función es estabilizar la estructura. El denominado encostillado que pueden ser planchas metálicas o tablones de madera que proporcionan un soporte adicional a la fortificación, además de contener fragmentos desprendidos a lo largo del túnel. Finalmente, elementos de bloqueo que variar entre tablones de madera o los denominados bolsacretos, que son simples sacos de cemento, rociados con agua y colocados entre los arcos y la superficie rocosa, permitiendo una mejor distribución los esfuerzos en los arcos (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía Perú, 2004).

Figura 10. Instalación de cimbras.

Fuente: **(***Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) Perú, 2004***)**

La ventaja de este sistema radica en la resistencia tanto a la tracción como a la compresión que ofrecen, soportando grandes esfuerzos de flexión incluso después de que el macizo sufriera importantes deformaciones. Cabe añadir que, estas deformaciones se pueden evitar con la rápida instalación de los arcos, al desarrollar un temprano sostenimiento.

1.10.1. Arcos rígidos

Su nombre se debe a que una vez armados no permiten movimientos o ajustes significativos en su geometría, por que requieren instalaciones precisas acorde a las condiciones del macizo rocoso.

Usados para terrenos con poca propensión a la expansión y bajas cargas, con caída de bloques. Se conforman de diferentes secciones y dentro del ámbito minero son usados en túneles que requieran soporte para grandes tensiones periféricas, ya que su rigidez estructural permite absorber y redistribuir los esfuerzos, evitando deformaciones.

Una falencia de estos arcos, consta de un mayor deterioro que los deslizantes, por su incapacidad de cadencia, lo que hace que los esfuerzos actuantes se incrementen rápidamente (Ponce, 2021).

1.10.2. Arcos deslizantes

A diferencia de los rígidos, están conformados por de tres o más segmentos de acero que pueden desplazar entre sí mediante un sistema de uniones atornilladas o encajes especiales. Estas uniones dotan a los arcos deslizantes de la capacidad de adaptarse gradualmente a las deformaciones provocadas por los esfuerzos del macizo rocoso, al deslizar segmentos unos sobre otros, permitiendo la absorción controlada de esfuerzos generados por el macizo rocoso.

Son ideales para zonas donde se espera comportamiento plástico, con alta presión o tendencia a deformaciones progresivas, que den origen a reajuste del terreno, mitigando el riesgo de colapso (Ponce, 2021).

1.11. Hormigón lanzado

También conocido como shotcrete, consiste en un mortero formado de una mezcla de cemento, arena y otros agregados, que es transportado y lanzado a gran velocidad sobre la superficie que necesite el refuerzo, sellando el plano de la roca junto a las fracturas que esta tenga, evitando la descompresión y la alteración de esta. Para minimizar el uso de malla de refuerzo, se le añaden fibras de acero en la composición del concreto, estas fibras también otorgan mayor ductilidad, que permiten una mayor adaptabilidad a la forma de la superficie (Herbert et al., 2018).

En minería, el shotcrete es mayoritariamente usado en excavaciones subterráneas que involucren macizos rococos alterados, sin cohesión y sueltos, ya que permiten sellar las superficies fracturadas. También se puede encontrar en minería a cielo abierto para reforzar permanentemente taludes cuya roca tiene un alto nivel de erosión, esto durante la fase de cierre y abandono (Guyer, 2020).

La protección de la pendiente debe drenarse adecuadamente para evitar daños por presión de elevación excesiva. La aplicación de hormigón proyectado a
la superficie de los vertederos y otras áreas de desechos es beneficiosa para evitar la infiltración de aguas superficiales.

Se pueden reconocer dos tipos de shotcrete, el primero por vía húmeda, donde todos los componentes son mezclados junto al agua antes de su proyección, así eliminando la generación de polvo en el ambiente. La carga es transportada hasta la boquilla de proyección, mediante aire comprimido o bombas de agua. En segundo método es por vía seca, donde todos los elementos del mortero y el agua, son combinados en la boquilla de salida antes de ser aplicada (Latorre y Contreras, 1994).

Los aspectos que se consideran en el shotcrete son:

- Proporción y elementos de la mezcla del shotcrete.

- La resistencia y espesor del concreto lanzado, evitando zonas donde la capa sea más delgada.
- Cantidad, calidad, química y drenaje de las aguas subterráneas detrás de la capa de concreto, que pueden debilitarlo con el tiempo.
- Normas y reglamentos regionales, prestando especial importancia a los requerimientos mínimos de seguridad.
- Monitoreo mediante ensayos de rendimiento, resistencia a compresión simple (RCS) y absorción de energía.
- Condiciones previas la superficie, recomendándose que la superficie a proyectar se encuentre libre de polvo y libre de la mayor cantidad de elementos sueltos, junto un correcto ángulo de la boquilla adecuado, para disminuir el desperdicio de la mezcla.

Como se mencionó la calidad del shotcrete esta influenciada por los diversos componentes que conforman la mezcla, y según Latorre y Contreras (1994), los principales componentes son:

- Áridos: Sus características no varían de gran manera, en comparación a las exigencias del hormigón tradicional en: resistencia, limpieza y granulometría, esta última pudiendo variar según las pautas entregadas por el fabricante del equipo que valla a utilizar para su aplicación. Aun así, alto porcentaje de finos es requerido para unificar las partículas y asegurar la adhesión del shotcrete, reduciendo el rebote. Así mismo, los granos gruesos son básicos para una estructura equilibrada, evitar acumulación de finos y una balanceada compactación.
- Cemento: Se debe seleccionar un cemento de alta resistencia al considerar su mayor rapidez de fraguado.

Si bien se debe agregar las proporcionas indicadas por el fabricante, la norma para la dosificación consta de 1 m^3 de áridos, por cada 250 kilos de cemento. En cuanto a la proporción agua-cemento, esta varía entre 0.3-0.5 en mezclas secas y 0,4 -0.6 para mezclas húmedas.

- Aglutinantes: Proporciones entre 250 y 450 kilos por 1 m^3 de áridos con humedad natural, porción de cemento superior al de la mezcla en seco. Cabe aclarar que en casos donde se presente una alta concentración de sulfatos en el ambiente, el cemento deberá ser resistente a los sulfatos.
- Malla de metal: Se coloca una malla de acero, preferentemente electro soldada dado su rígides, como última capa, aplicando sobre ella las siguientes capas de concreto, quedando enterrada en el concreto lanzado. Se debe evitar la generación del llamado efecto sombra (Shadowing), que hace referencia a las cavidades vacías detrás de la malla, por una mala distribución de la lechada.
- Fibras: Durante el proceso de secado se generan pequeños esfuerzos que disminuyen la calidad del shotcrete, la llamada retracción plástica, provocando la aparición de pequeñas fisuras, para mitigar este efecto se propuso añadir fibras de diversos tipos que permitan absorber estos esfuerzos.

Los primeros proyectos que incluían estas fibras las medidas de longitud y diámetro eran inadecuados resultando en una redistribución pobre de las fibras, corrigiendo esto con una simple reducción en las relaciones de forma, también no todos los materiales resultaban adecuados, ya que no cumplían con la resistencia, tenacidad y absorción de esfuerzos requerida, no obstante, se destacaron dos tipos de fibras las metálicas y las de vidrio.

La fibra de acero, se tratan de filamentos de alta resistencia, es de las más usadas en minería, debido a que aporta una alta resistencia mecánica, además aumentar la

ductilidad y la capacidad de absorción de energía del shotcrete, ideal para operaciones que involucren voladura, pero suelen presentar problemas de corrosión en ambientes con fuerte presencia de humedad o por reacciones adversar con los aditivos, sin mencionar el considerable aumento en la densidad de la mezcla.

La fibra de vidrio, son filamentos de materiales, generalmente de circonio, con alta resistencia al ambiente alcalino del concreto o los sulfuros de las aguas subterráneas, añaden un mejor comportamiento mecánico para el shotcrete además de no verse afectada por la presencia de humedad, pero estas requieren de un equipo y proceso diferente al tradicional aumentando los costos, además tener una menor capacidad estructural en comparación a las fibras de metal.

- Agua: Al igual que los áridos sus características no varían de los ya establecidos en la norma de hormigones.

Dependiendo del tipo de concreto, el agua se encontrará previamente incorporada en la mezcla, este siendo el caso del concreto por vía húmeda, donde la cantidad de agua debe regirse por las necesidades de impulso y dosificación del equipo. Por otro lado, mediante vía seca, la ración de agua será administrada por la técnica de aplicación, añadiéndose mediante el gunitador a un conducto independiente.

El control de agua es esencia, ya que un porcentaje menor de agua, generaría polvo y por ende perdida de elementos, en el caso contrario, un exceso de agua dará un hormigón demasiado líquido el cual tendrá dificultades de adherencia, que genera perdida de mezcla, y tiempos de fraguado mayores.

- Aditivos: Son imprescindibles, para aplicaciones de gruesas capas de shotcrete en corto tiempo, al ser sustancias químicas que alterar las propiedades del hormigón para conseguir efectos como una mayor velocidad del fraguado, y una mejor impermeabilidad o adherencia.

Preferentemente se usan aditivos líquidos que mantienen la homogeneidad de la mezcla, ya que la generación de polvo, no es aconsejable, al provocar un fraguado prematuro de la mezcla.

Los aditivos se categorizan en:

- Acelerantes de fraguado: Como se puede intuir, utilizados para reducir el tiempo de fraguado del shotcrete, donde se necesita soporte inmediato por riesgo de derrumbes. Constan de compuestos química como: silicatos, nitratos de sodio o calcio y aluminatos.

- Fluidificantes: Son elementos, corrientemente lignosulfonatos y ácidos hidroximonosulfónicos, que cumplen la función de reducir la cantidad de agua sin afectar la resistencia y aumentar la fluidez de la mezcla para una mejor proyección.

También se pueden encontrar una variante llamada superfluidificantes que son: policarboxilatos, naftalina o melamina sulfonada, cuyo efecto es significativamente mayor a los fluidificantes.

- Retardadores de fraguado: Usados con el objetivo contrario a los acelerantes, se emplean para prolongar el tiempo de fraguado del shotcrete, permitiendo una aplicación más controlada de este. Usualmente son yeso y cloruros de calcio.

- Impermeabilizantes: Agregados para evitar el deterioro del shotcrete por agentes químicos presentes en la actividad minera, son: sílice coloidal, resinas de silicona o polipropileno.

Figura 11. Aplicación de revestimiento grueso de hormigón proyectado.

Fuente: (Consorcio Condotte-Cossi, 2016)

CAPITULO 2

METODOLOGIA

2.1. Selección de parámetros

Para la evaluación de parámetros, se seleccionaron 3 de los 5 que conforman la clasificación RMR, los cuales son: resistencia a la compleción simple (RCS), Rock Quality Designation (RQD) y distancia entre diaclasas, puesto que estos parámetros además de contar con sus propias gráficas, lo que facilitaría su análisis, no se encuentran influenciadas por la subjetividad, es decir, son parámetros concisos e imparciales, que no quedan al criterio de los especialistas que los evalúen, pues sus valores son obtenidos mediante pruebas en laboratorio, o son fácilmente verificables en campo.

De este modo el descarte de los 2 parámetros restantes, condiciones entre diaclasas y condiciones hidrológicas, se debe a que estos no solo engloban la evaluación de varios parámetros en una sola categoría, si no que, pueden ser influenciados por la opinión de cada especialista, dando un amplio rango de resultados para un mismo macizo.

Esto se puede destacar, en las condiciones entre diaclasas, con el tipo de superficie, variable entre “Muy rugosa” a “Lisa”, la cual no cuenta con una metodología propia parea su identificación y queda a criterio propio. De la misma forma se puede mencionar las condiciones hidrológicas, que pueden variar a lo largo del tiempo, dado que están sujetas a las circunstancias climáticas de la región.

2.2. Evaluación

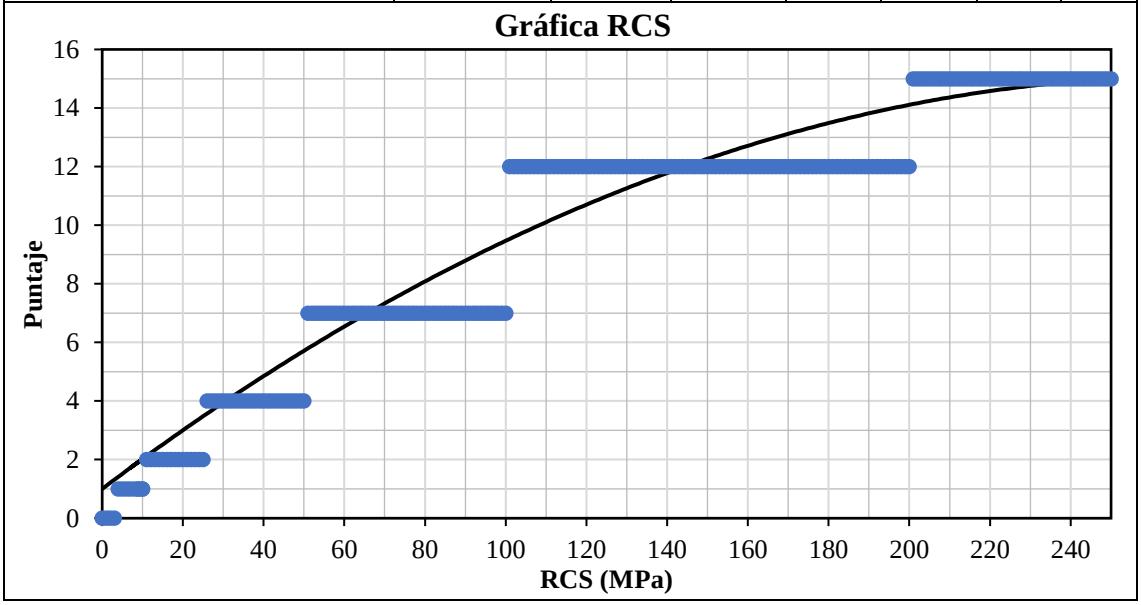
Conforme a lo ya explicado, para la evaluación inicial de los parámetros seleccionados, se procedió a crear las rectas propuestas por Bieniawski, para tener un

puntaje preciso representada de color negro y, la nube de puntos correspondientes al puntaje asignado en tablas, de color celeste.

Con esta evaluación inicial se busca identificar los valores límite, tanto inferiores como superiores, con el fin de establecer una curva de variación de puntaje. Para ello, se considerarán a los puntos o intervalos de la curva que se ubiquen por encima uno de los elementos ya mencionados, como valores máximos y el elemento por debajo de otro como puntaje mínimo. Cabe aclarar que, para evitar confusiones con la asignación de puntaje con respecto a los intervalos de rangos de las tablas, se optó por una tendencia desfavorable. Esto significa que, valores como 25 MPa, que establecen el paso de 2 puntos (10 a 25 MPa) a 4 puntos (25 a 50 MPa) en el parámetro RCS, se optara por mínimo valor asignable para su puntaje, es decir, 2 puntos para el ejemplo presentado.

Tabla 11. Gráfica y puntos, RCS

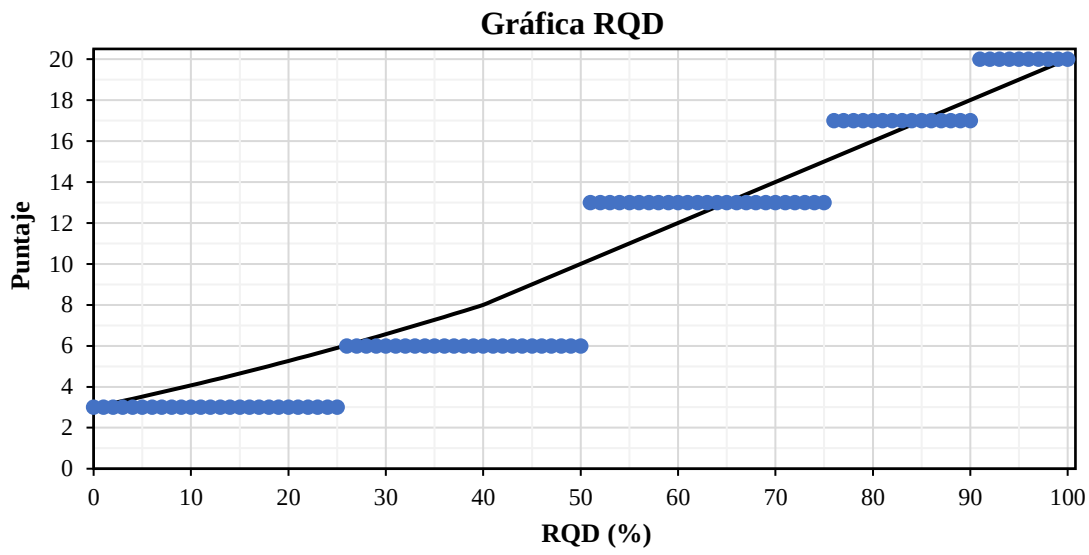
RCS (MPa)	Compresión simple	> 200	200-100	100-50	50-25	25-10	10-3	3-0
Puntación		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 12. Gráfica y puntos, RQD

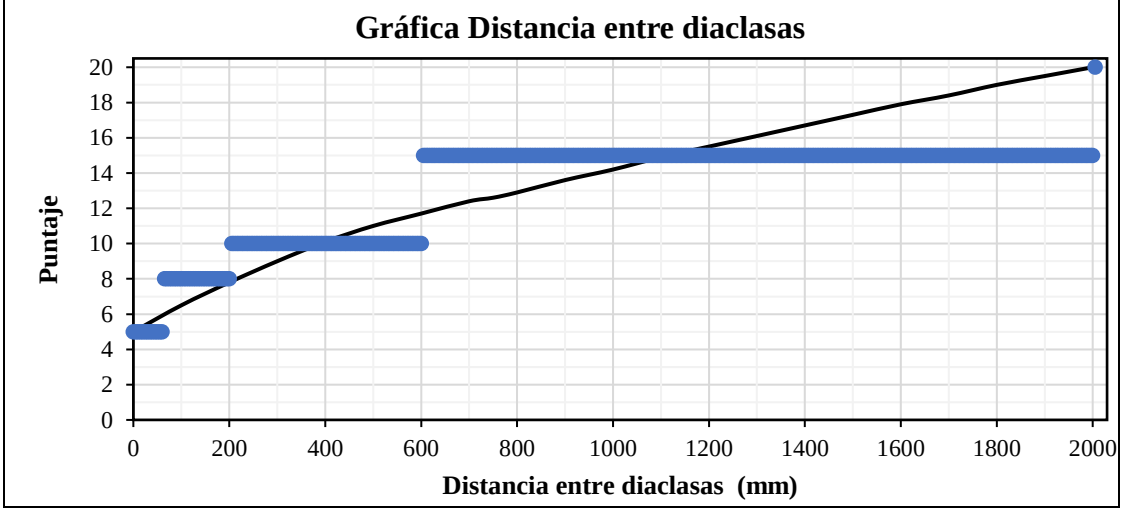
RQD (%)	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	≤ 25%
Puntación	**20**	**17**	**13**	**6**	**3**



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 13. Gráfica y puntos, Distancia entre Diaclasas

Distancia entre diaclasas (mm)	> 2m	600 - 2000 mm	200 - 600 mm	60 - 200 mm	≤ 60mm
Puntación	**20**	**15**	**10**	**8**	**5**



Fuente: Elaboración Propia.

En lo concerniente al parámetro RQD y distancia entre diaclasas, los valores extremos de la nube puntos parecen ser los valores ideales para conformar de las rectas, pues las curvas de Bieniawski, en la mayoría de sus extensiones, mantiene valores medios que atraviesan parte del conjunto de puntos, ya sea por la mitad o cerca de los bordes, pero nunca se ubican por encima o debajo de la totalidad de dicho conjunto, provocando que sean poco inviables para su elección, dado que no son valores mínimos o máximos.

Para el parámetro RCS, también se puede apreciar el mismo comportamiento que los dos parámetros anteriores, es decir la recta atraviesa en mayor o menor medida la nube de puntos, pero se distingue un instante donde la recta está por encima de dicho conjunto, este trayecto abarca los dos primeros rangos de puntaje, de 0-3 MPa y 3-5 MPa, por lo que en ese recorrido se elegirá los puntos pertenecientes a la recta y en adelante optará por puntos de la nube.

2.2.1. Creación de límites de puntaje

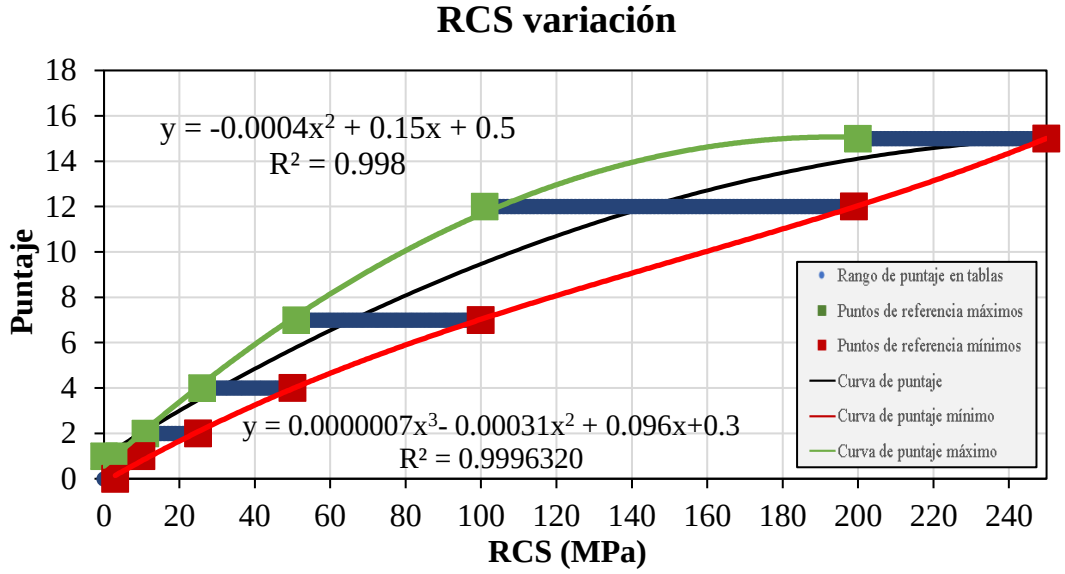
A partir de la observación inicial, se procedió a crear las rectas que permita establecer los límites máximos y mínimos, seleccionando los valores extremos en función al comportamiento analizado de la nube de puntos y las curvas de Bieniawski. Esto mediante el programa Excel, que permite proponer diferentes tipos de ecuaciones, a partir de un conjunto de puntos y seguidamente verificar su exactitud, por medio del coeficiente de determinación "R^2", para evaluar el grado de ajuste entre el conjunto de puntos seleccionados y la curva obtenida.

Como es de esperarse, se seleccionaron las ecuaciones que presentaron un mayor grado de precisión, con un valor de R^2 más cercano a 1, y que mantengan coherencia entre sí, evitando el cruce entre ellas, verificando que la curva de puntaje máximo se mantuviera siempre por encima de la curva puntaje mínimo, además asegurar que la nube

de puntos y la recta de referencia se mantuviera dentro del área que formarían las dos curvas. Resultando que la mayoría de ecuación corresponderían del tipo polinómica de rango 2.

Tabla 14. Variación RCS

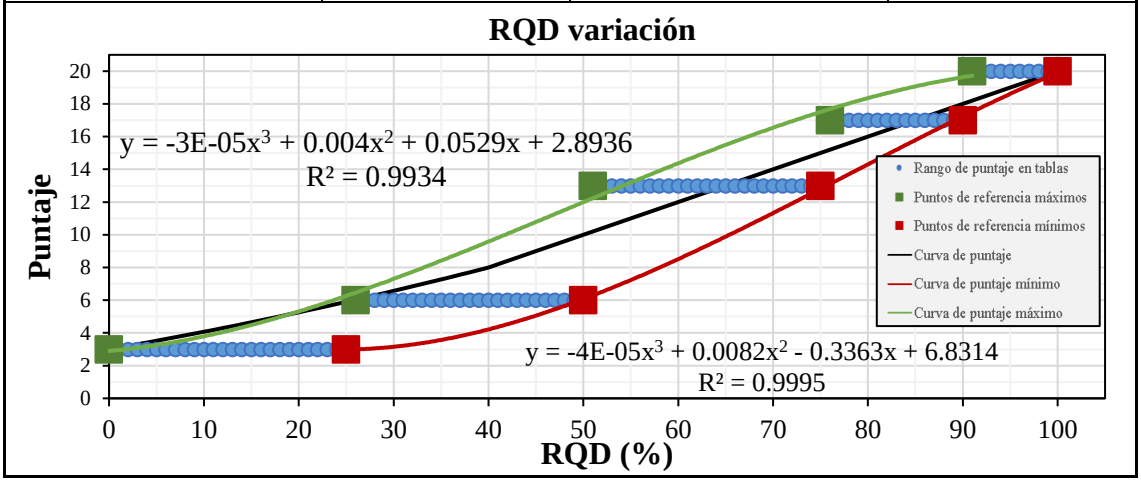
Puntos recta superior		Puntos recta inferior	
RCS (MPa)	Puntaje	RCS (MPa)	Puntaje
0	1	3	0
4	1	10	1
11	2	25	2
26	4	50	4
51	7	100	7
101	12	199	12
200	15	250	15



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 15. Variación RQD

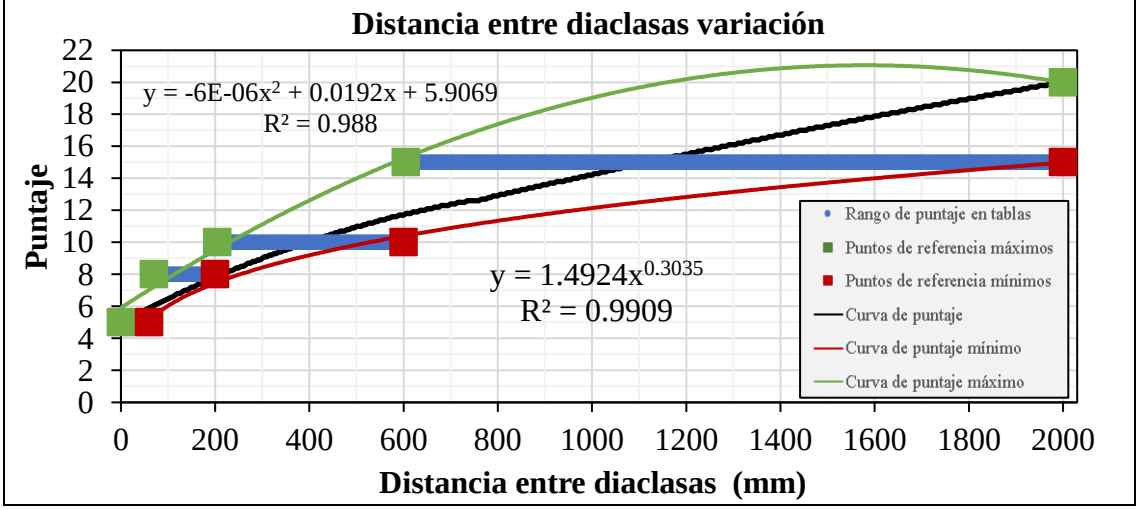
Puntos recta superior		Puntos recta inferior	
RQD (%)	Puntaje	RQD (%)	Puntaje
0	3	25	3
26	6	50	6
51	13	75	13
76	17	90	17
91	20	100	20



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 16. Variación Distancia entre Diaclasas

Puntos recta superior		Puntos recta inferior	
Distancia diaclasas (mm)	Puntaje	Distancia diaclasas (mm)	Puntaje
0	5	60	5
70	8	200	8
205	10	600	10
605	15	2000	15
2000	20		



Fuente: Elaboración Propia.

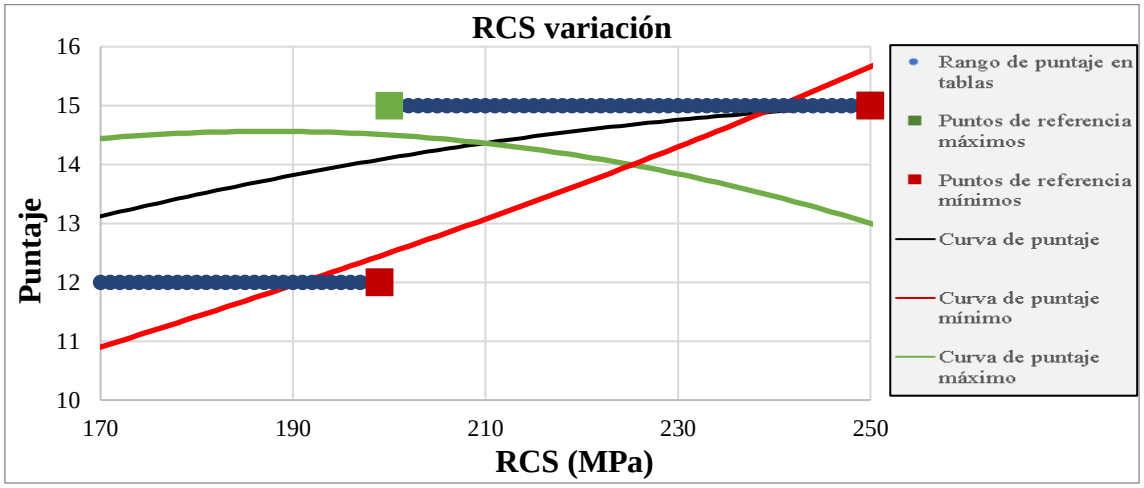
2.2.2. Errores de las curvas

Aparentemente, las ecuaciones obtenidas no muestran ningún error a simple vista, no obstante, al momento verificarlas, durante el procesamiento de datos en fases más avanzadas, se encontraron incongruencias con ciertos valores.

Cabe aclara que, al no ser ecuaciones perfectas, pues su R^2 no es 1, era indudable que surgirían errores, pero no al nivel observado, dado amplios rangos de puntaje se vuelven totalmente incongruentes con las curvas obtenidas, provocando su revisión y corrección.

En el caso de las curvas del RCS, su principal falencia se encuentra en el rango de 190 MPa a 250 MPa, dado que, como se puede observar la curva de puntaje máximo decrece atravesando la nube de puntos, provocando un cruce con la curva de puntaje mínimo.

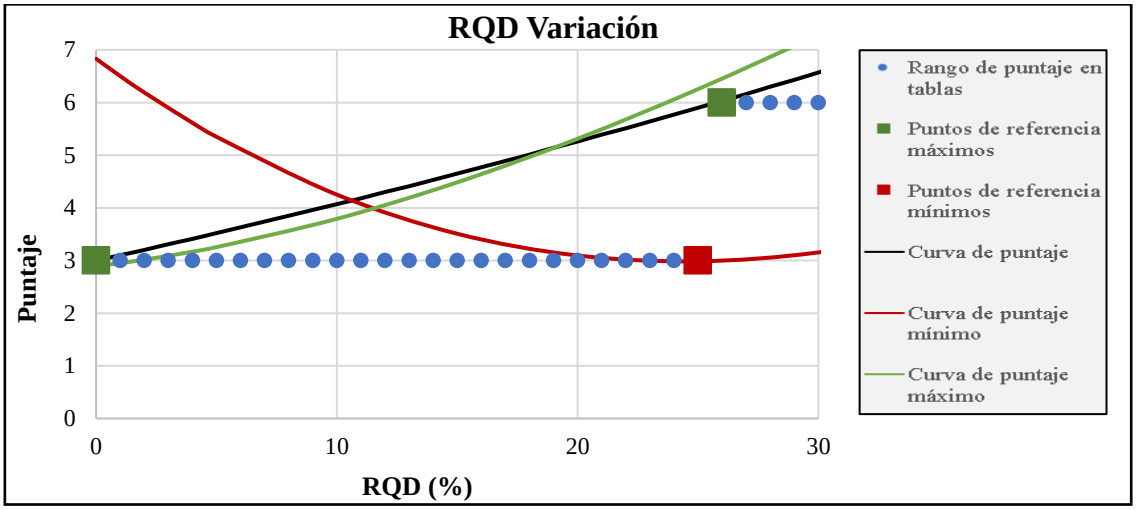
Figura 12. Errores principales, curvas de variación de RCS



Fuente: (Elaboración Propia)

Las curvas de RQD se presentan un problema similar, en los rangos iniciales, 0 al 25%, donde la curva de puntaje mínimo está por encima de la nube de puntos, provocando una intercesión. Adicionalmente se destaca que la curva de puntaje máximo esta ligeramente por debajo de curva de puntaje de Bieniawski.

Figura 13. Errores principales, curvas de variación de RQD

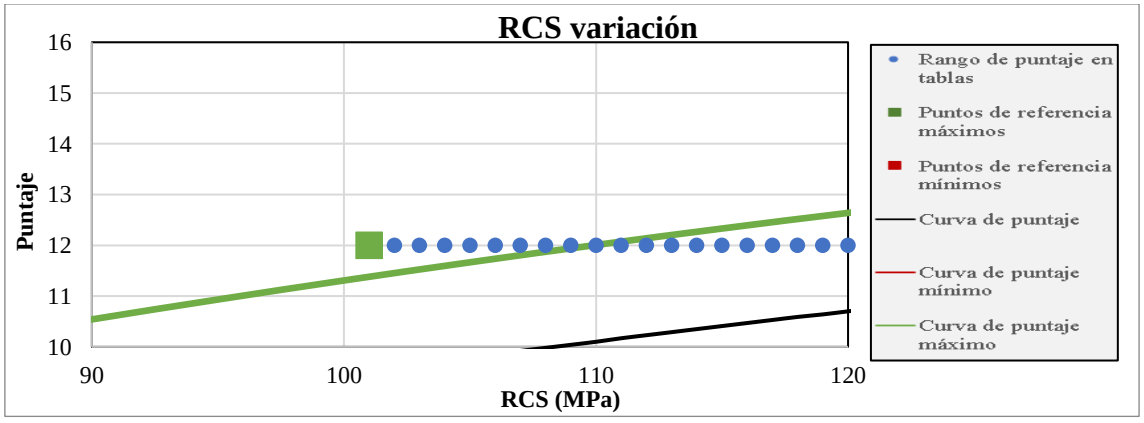


Fuente: Elaboración Propia

Respecto a la variable de distancia entre diaclasas, no se encontraron fallos relacionados con cruces de las curvas mínima y máxima.

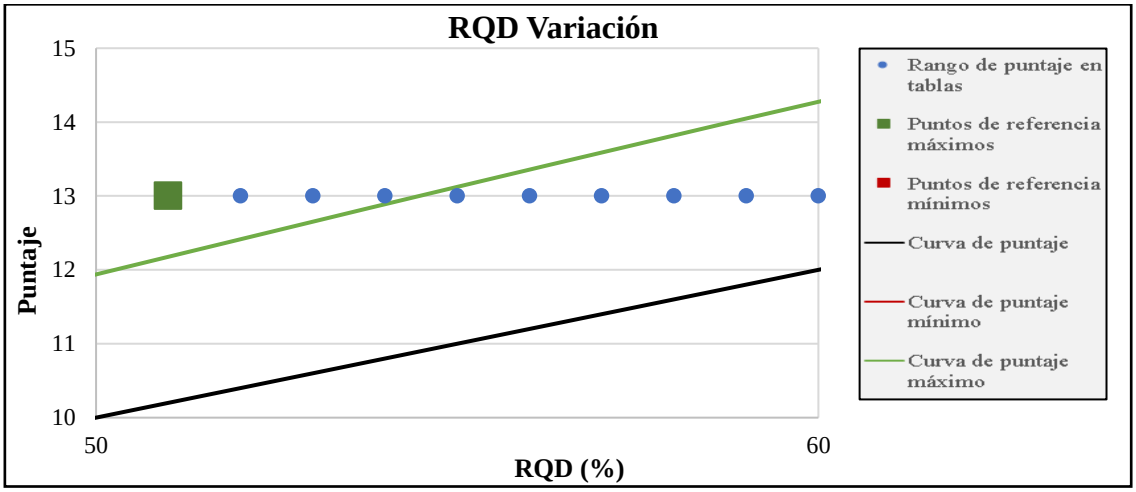
Adicionalmente a los errores ya presentados, los tres parámetros tienen un problema en común, pues las curvas identificadas en determinados rangos de puntaje, tienen cruces con la nube de puntos y la recta de referencia. Si bien estos rangos de intercesión, son menores a los presentados anteriormente y son más tolerables, dado a que se los puede atribuir al error de las ecuaciones, se deben considerar para reducir su influencia, en la medida de lo posible.

Figura 14. Errores secundarios, curvas de variación de RCS



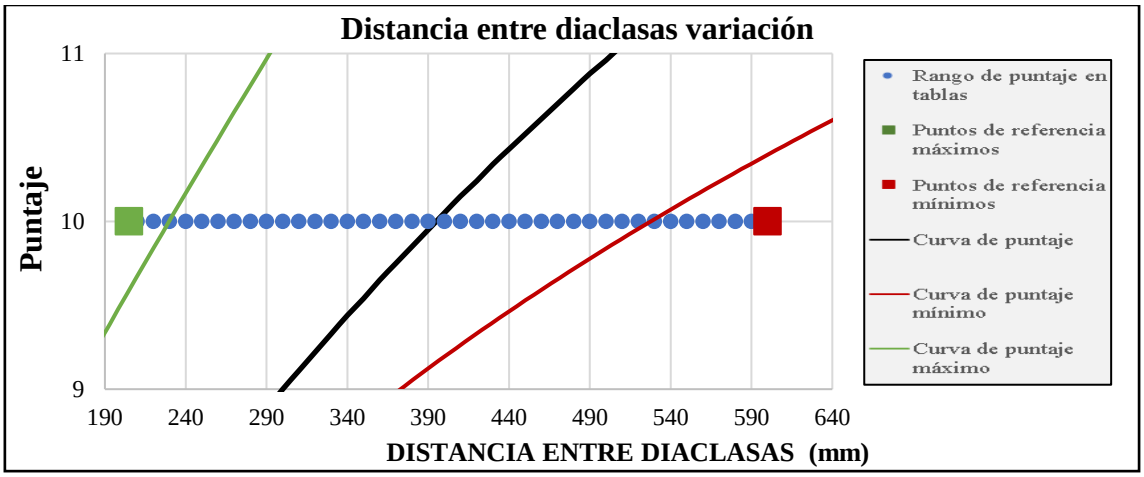
Fuente: Elaboración Propia

Figura 15. Errores secundarios, curvas de variación de RQD



Fuente: Elaboración Propia

Figura 16. Errores secundarios, curvas Distancia entre Diaclasas



Fuente: Elaboración Propia

2.2.3. Corrección de las curvas

Para rectificar las ecuaciones, inicialmente se emplearon tres correcciones generales.

La primera, consta de dar un punto origen y terminación igual para las rectas, esto ya que los errores principales se concentran en estos segmentos.

La segunda consistía en tomar la mayor cantidad de puntos en las zonas donde se tienen errores, esperando que de este modo la ecuación se adapte con mayor precisión.

La tercera consta de la reducción de puntos, agregados en pasos anteriores o durante la sección inicial, en secciones donde los errores persistan. Este sistema se siguió hasta completar las correcciones.

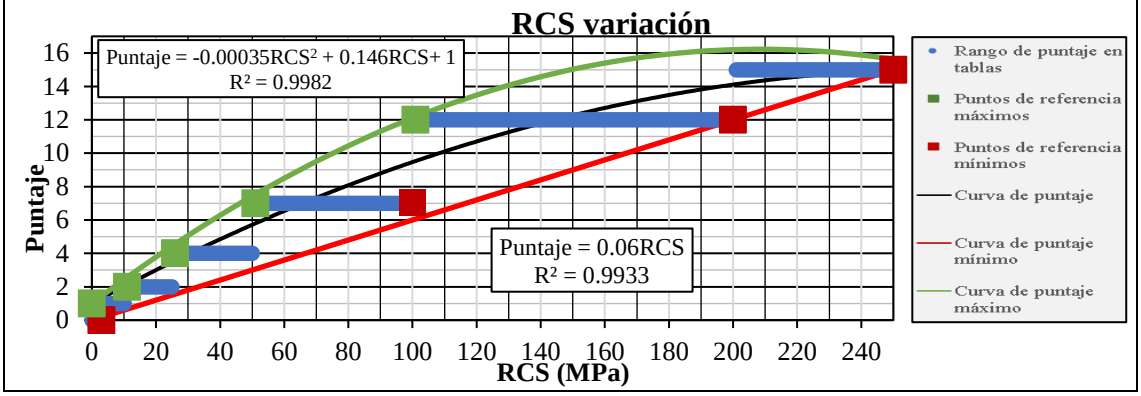
Estos métodos tienen resultados variados para cada parámetro, puesto que una sección de la curva era corregida, mientras otra área con errores permanecía sin cambios o empeoraba, por lo que, se consideró limitar la cantidad de valores añadidos, no más de dos, en los rangos de un conjunto de puntos, y también se descartó la idea de un punto de origen común para algunos parámetros. Consiguiendo perfeccionar las dos curvas del parámetro RCS y curva de puntaje mínimo del parámetro RQD, con la implementación de estas consideraciones.

Con las observaciones anteriores, en búsqueda de mayor presión en las rectas faltantes, como un cuarto paso, se consideró añadir puntos de las rectas de Bieniawski, que anteriormente fueron descartados en segmentos donde las curvas presenten cruces con dicho elemento. Finalmente, corrigiendo casi la totalidad de fallos, para los parámetros faltantes.

Resultando en las siguientes curvas corregidas:

Tabla 17. Gráfico variación RCS, corregida

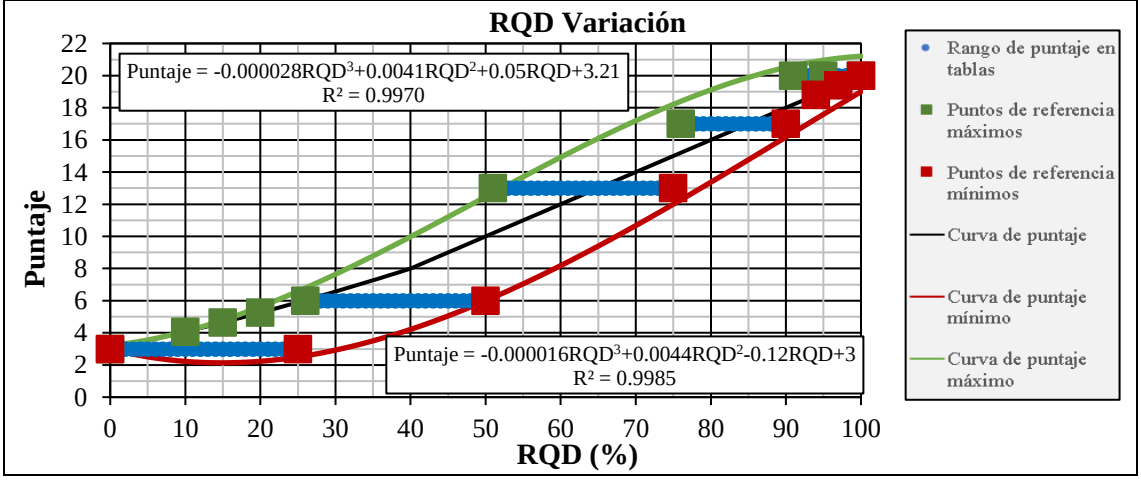
Puntos recta superior		Puntos recta inferior	
RCS (MPa)	Puntaje	RCS (MPa)	Puntaje
0	1	3	0
11	2	100	7
26	4	200	12
51	7	250	15
101	12		
250	15		



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. Gráfico variación RQD, corregida

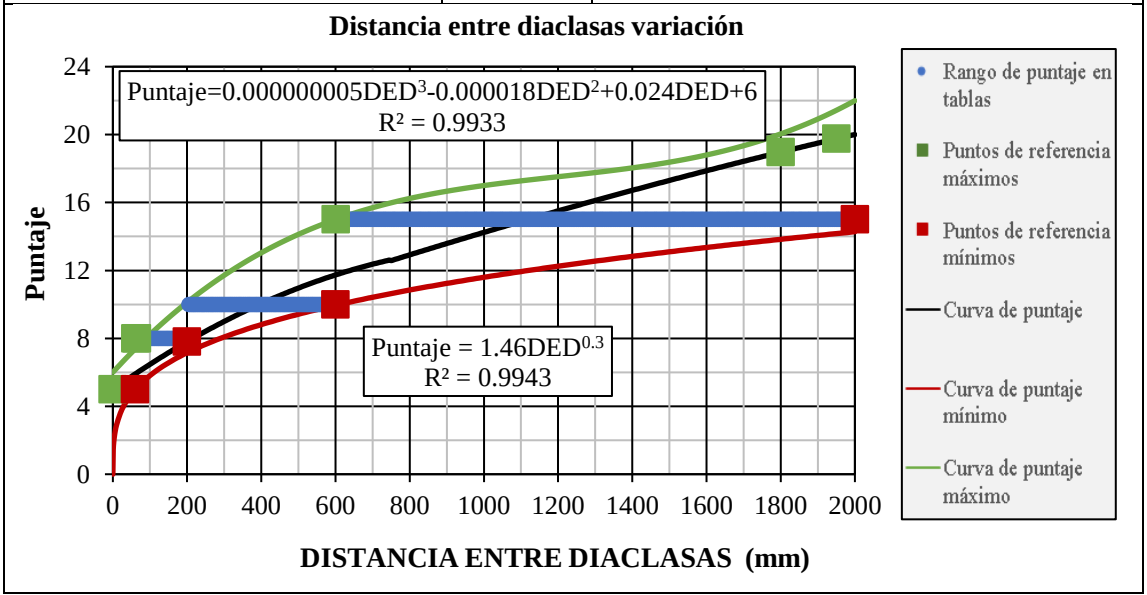
Puntos recta superior		Puntos recta inferior	
RQD (%)	Puntaje	RQD (%)	Puntaje
0	3	0	3
10	4.07	25	3
15	4.65	50	6
20	5.26	75	13
26	6	90	17
51	13	94	18.8
76	17	97	19.4
91	20	100	20
95	20		
100	20		



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19. Gráfico variación Distancia entre Diaclasas, corregida

Puntos recta superior		Puntos recta inferior	
Distancia diaclasas (mm)	Puntaje	Distancia diaclasas (mm)	Puntaje
0	5	60	5
61	8	200	7.81
65	8	600	10
601	15	2000	15
1800	18.97		
1950	19.75		



Fuente: Elaboración Propia

2.2.4. Errores persistentes

Si bien se ha reducido la presencia de errores al mínimo, aun se evidencia ciertas incongruencias, únicamente para los intervalos que corresponde al puntaje en tablas, los errores se especifican en la tabla 20.

Tabla 20. Errores persistentes

Intervalo de error en la curva de puntaje mínimo RCS						
RCS (MPa)		Puntaje				
		Puntaje mínimo	En tablas	Mínimo-En tablas	En recta	Mínimo-En recta
Rango	1	0.06	0	0.06	1.1	-1.04
	3	0.18	0	0.18	1.31	-1.13
Intervalo de error en la curva de puntaje máximo RQD						
RQD (%)		Puntaje				
		Puntaje mínimo	En tablas	Máximo -En tablas	En recta	Mínimo-En recta
Rango	51	12.71	13	-0.29	10.2	2.5
	52	12.96	13	-0.04	10.4	2.55
Intervalo de error en la curva de puntaje máximo Distancia entre Diaclasas						
Distancia entre Diaclasas (mm)		Puntaje				
		Puntaje máximo	En tablas	Máximo-En tablas	En recta	Mínimo-En recta
Rango	61	7.46	8	-0.54	5.91	1.55
	85	7.99	8	-0.01	6.26	1.74

Fuente: Elaboración Propia

A diferencia de los errores solucionados anteriormente, los presentados por las nuevas curvas son mínimos y se les puede atribuir su valor de R^2, los cuales si bien son cercanos a 1 todavía tiene cierto margen de error.

Destacando que dicho margen comprende intervalos muy reducidos, 1-3 MPa y 51-52%, para los parámetros RCS y RQD respectivamente y un intervalo relativamente más extenso para el parámetro Distancia entre Diaclasas, que comprende los valores de 61-84 mm, un intervalo pequeño considerando que este factor abarca valores de 0 hasta 2000 mm, antes de asignar un puntaje fijo para distancias superiores a los 2000 mm.

2.3. Elaboración de métodos para el cálculo de RMR mínimo y máximo sin medios de cálculo preciso

Con las curvas de puntaje máximo y mínimo establecidas, se planteó la interrogante de cómo aplicarlas en caso no se cuente con los implementos necesario para procesar los datos, dado que las ecuaciones tienen cierto nivel de complejidad, lo que dificultaría su cálculo de manera manual, o en dado caso se desee agilizar el cálculo de RMR mínimo y máximo, para determinar un cambio en la clasificación de RMR rápidamente.

A partir de esta problemática, se propusieron dos métodos que permiten determinar de manera rápida y eficiente el RMR Mínimo y Máximo, sin requerir el cálculo directo de las rectas.

2.3.1. Clasificación por influencia

De este modo, se desarrollaron dos métodos que surgen partir de una misma clasificación, la cual consta de asignar mayor o menor relevancia a la variación del puntaje, en función del resultado de la diferencia entre la curva de puntaje mínimo o máximo y la recta de referencia Bieniawski o el puntaje en tablas.

- Diferencia mínima de la Tabla=DmT= Puntaje en tabla – Puntaje mínimo
- Diferencia máxima de la Tabla=DMT= Puntaje en tabla – Puntaje máximo
- Diferencia mínima de la Recta=DmR= Puntaje en la recta – Puntaje mínimo
- Diferencia máxima de la Recta=DMR= Puntaje en la recta – Puntaje máximo

Para conformar las categorías correspondientes, se inició con la observación de los gráficos corregidos, donde se pudo distinguir, que raramente la variación del puntaje de la recta mínima o máxima, era superior o inferior a los ±3 puntos, por lo cual se decidió englobar en una solo categoría dichos valores, dado que representan una minoría.

Para establecer las categorías restantes, se consideró que deberían contener valores entre -3 y 3, se establecieron rango que los varíen ±1 punto, pues al establecer este rango de intervalos se mantienen la uniformidad de la clasificación, su simpleza y facilita la identifica rápida, cualidades fundamentales

Así, la clasificación se conforma de cuatro clases, “Mínima” para variaciones variables entre ±1 punto, “Moderada” para variaciones entre ±1 a ±2 puntos, “Considerable” valores entre de ±2 a ±3 puntos y “Muy considerable” para diferencias mayores a los ±3 puntos, como se indica en la tabla 21.

Tabla 21. Rangos de influencia

Nivel de Influencia	**Rango de Diferencia**
Mínima	$(-1 \leq x \leq 1)$
Moderada	$(-2 \leq x < -1)$ o $(1 < x \leq 2)$
Considerable	$(-3 \leq x < -2)$ o $(2 < x \leq 3)$
Muy considerable	$(x < -3)$ o $(x > 3)$

Fuente: Elaboración Propia

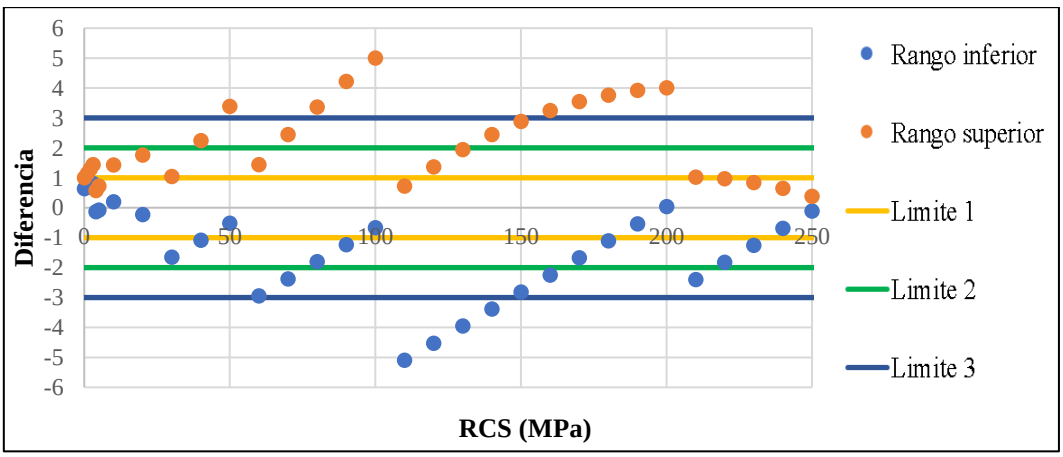
Con la clasificación establecida, se procedió a establecer los rangos para cada parámetro.

Tabla 22. Rangos de influencia de RCS mediante tabla

RCS	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo	DmT	DMT	Influencia, límite inferior	Influencia, límite superior
0	0	0	1	0	1	Mínima	Mínima
4	1	0.24	1.58	-0.76	0.58	Mínima	Mínima
5	1	0.3	1.72	-0.7	0.72	Mínima	Mínima
10	2	0.6	2.43	-1.4	0.43	Moderada	Mínima
20	2	1.2	3.78	-0.8	1.78	Mínima	Moderada
30	4	1.8	5.07	-2.2	1.07	Considerable	Moderada
40	4	2.4	6.28	-1.6	2.28	Moderada	Considerable
50	4	3	7.43	-1	3.43	Mínima	Muy Considerable
60	7	3.6	8.5	-3.4	1.5	Muy Considerable	Moderada
70	7	4.2	9.51	-2.8	2.51	Considerable	Considerable
80	7	4.8	10.44	-2.2	3.44	Considerable	Muy Considerable
90	7	5.4	11.31	-1.6	4.31	Moderada	Muy Considerable
100	7	6	12.1	-1	5.1	Mínima	Muy Considerable
110	12	6.6	12.83	-5.4	0.83	Muy Considerable	Mínima
120	12	7.2	13.48	-4.8	1.48	Muy Considerable	Moderada
130	12	7.8	14.07	-4.2	2.07	Muy Considerable	Considerable
140	12	8.4	14.58	-3.6	2.58	Muy Considerable	Considerable
150	12	9	15.03	-3	3.03	Considerable	Muy Considerable
160	12	9.6	15.4	-2.4	3.4	Considerable	Muy Considerable
170	12	10.2	15.71	-1.8	3.71	Moderada	Muy Considerable
180	12	10.8	15.94	-1.2	3.94	Moderada	Muy Considerable
190	12	11.4	16.11	-0.6	4.11	Mínima	Muy Considerable
200	15	12	16.2	-3	1.2	Considerable	Moderada
210	15	12.6	16.23	-2.4	1.23	Considerable	Moderada
220	15	13.2	16.18	-1.8	1.18	Moderada	Moderada
230	15	13.8	16.07	-1.2	1.07	Moderada	Moderada
240	15	14.4	15.88	-0.6	0.88	Mínima	Mínima
250	15	15	15.63	0	0.63	Mínima	Mínima

Fuente: Elaboración Propia

Figura 17. Rangos de influencia de RCS mediante tabla



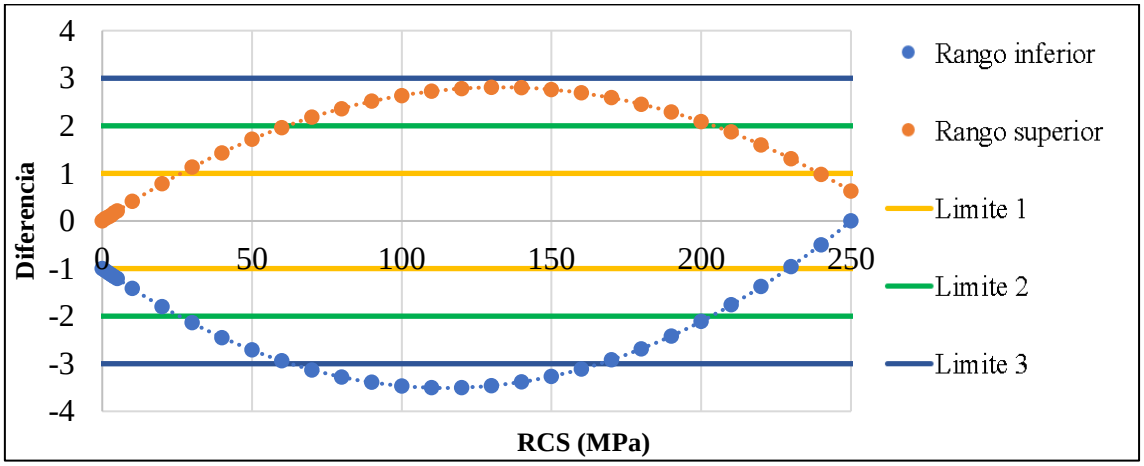
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23. Rangos de influencia de RCS mediante recta

RCS	Puntaje en la recta	Puntaje mínimo	Puntaje máximo	DmR	DMR	Influencia, límite inferior	Influencia, límite superior
0	1	0	1	-1	0	Mínima	Mínima
1	1.1	0.06	1.15	-1.04	0.05	Moderada	Mínima
2	1.21	0.12	1.29	-1.09	0.08	Moderada	Mínima
3	1.31	0.18	1.43	-1.13	0.12	Moderada	Mínima
4	1.41	0.24	1.58	-1.17	0.17	Moderada	Mínima
5	1.51	0.3	1.72	-1.21	0.21	Moderada	Mínima
10	2.02	0.6	2.43	-1.42	0.41	Moderada	Mínima
20	3	1.2	3.78	-1.8	0.78	Moderada	Mínima
30	3.94	1.8	5.07	-2.14	1.13	Considerable	Moderada
40	4.85	2.4	6.28	-2.45	1.43	Considerable	Moderada
50	5.71	3	7.43	-2.71	1.72	Considerable	Moderada
60	6.54	3.6	8.5	-2.94	1.96	Considerable	Moderada
70	7.33	4.2	9.51	-3.13	2.18	Muy Considerable	Considerable
80	8.08	4.8	10.44	-3.28	2.36	Muy Considerable	Considerable
90	8.79	5.4	11.31	-3.39	2.52	Muy Considerable	Considerable
100	9.47	6	12.1	-3.47	2.63	Muy Considerable	Considerable
110	10.1	6.6	12.83	-3.5	2.73	Muy Considerable	Considerable
120	10.7	7.2	13.48	-3.5	2.78	Muy Considerable	Considerable
130	11.26	7.8	14.07	-3.46	2.81	Muy Considerable	Considerable
140	11.78	8.4	14.58	-3.38	2.8	Muy Considerable	Considerable
150	12.27	9	15.03	-3.27	2.76	Muy Considerable	Considerable
160	12.71	9.6	15.4	-3.11	2.69	Muy Considerable	Considerable
170	13.12	10.2	15.71	-2.92	2.59	Considerable	Considerable
180	13.49	10.8	15.94	-2.69	2.45	Considerable	Considerable
190	13.82	11.4	16.11	-2.42	2.29	Considerable	Considerable
200	14.11	12	16.2	-2.11	2.09	Considerable	Considerable
210	14.36	12.6	16.23	-1.76	1.87	Moderada	Moderada
220	14.58	13.2	16.18	-1.38	1.6	Moderada	Moderada
230	14.76	13.8	16.07	-0.96	1.31	Mínima	Moderada
240	14.9	14.4	15.88	-0.5	0.98	Mínima	Mínima
250	15	15	15.63	0	0.63	Mínima	Mínima

Fuente: Elaboración Propia

Figura 18. Rangos de influencia de RCS mediante recta



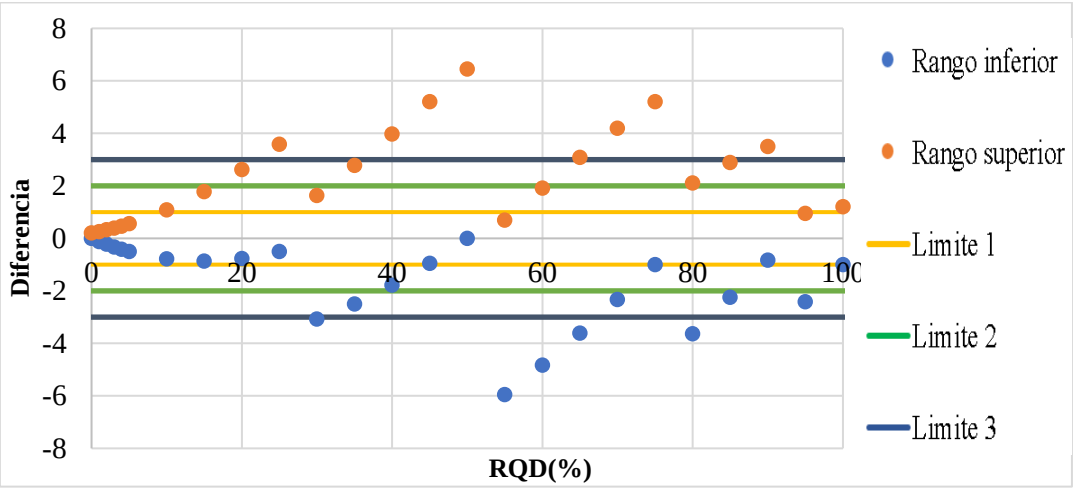
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24. Rangos de influencia de RQD mediante tabla

RQD	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo	DmT	DMT	Influencia, límite inferior	Influencia, límite superior
0	3	3	3.21	0	0.21	Mínima	Mínima
1	3	2.88	3.26	-0.12	0.26	Mínima	Mínima
2	3	2.78	3.33	-0.22	0.33	Mínima	Mínima
3	3	2.68	3.4	-0.32	0.4	Mínima	Mínima
4	3	2.59	3.47	-0.41	0.47	Mínima	Mínima
5	3	2.51	3.56	-0.49	0.56	Mínima	Mínima
10	3	2.22	4.09	-0.78	1.09	Mínima	Moderada
15	3	2.14	4.79	-0.86	1.79	Mínima	Moderada
20	3	2.23	5.63	-0.77	2.63	Mínima	Considerable
25	3	2.5	6.59	-0.5	3.59	Mínima	Muy Considerable
30	6	2.93	7.64	-3.07	1.64	Muy Considerable	Moderada
35	6	3.5	8.78	-2.5	2.78	Considerable	Considerable
40	6	4.22	9.98	-1.78	3.98	Moderada	Muy Considerable
45	6	5.05	11.21	-0.95	5.21	Mínima	Muy Considerable
50	6	6	12.46	0	6.46	Mínima	Muy Considerable
55	13	7.05	13.7	-5.95	0.7	Muy Considerable	Mínima
60	13	8.18	14.92	-4.82	1.92	Muy Considerable	Moderada
65	13	9.4	16.09	-3.6	3.09	Muy Considerable	Muy Considerable
70	13	10.67	17.2	-2.33	4.2	Considerable	Muy Considerable
75	13	12	18.21	-1	5.21	Mínima	Muy Considerable
80	17	13.37	19.11	-3.63	2.11	Muy Considerable	Considerable
85	17	14.76	19.89	-2.24	2.89	Considerable	Considerable
90	17	16.18	20.51	-0.82	3.51	Mínima	Muy Considerable
95	20	17.59	20.96	-2.41	0.96	Considerable	Mínima
100	20	19	21.21	-1	1.21	Mínima	Moderada

Fuente: Elaboración Propia

Figura 19. Rangos de influencia de RQD mediante tabla



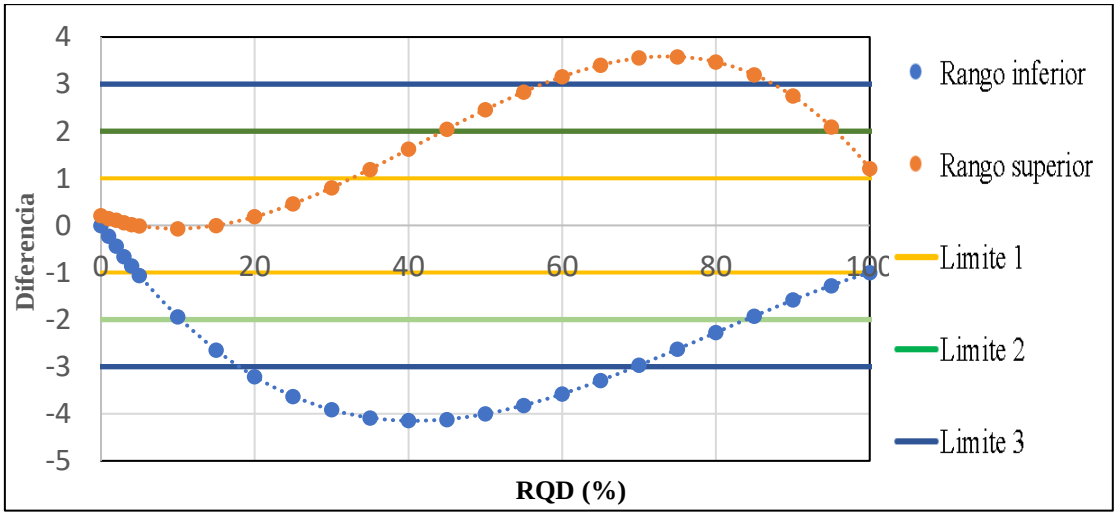
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25 Rangos de influencia de RQD mediante recta

RQD	Puntaje en la recta	Puntaje mínimo	Puntaje máximo	DmR	DMR	Influencia, límite inferior	Influencia, límite superior
0	3	3	3.21	0	0.21	Mínima	Mínima
1	3.11	2.88	3.26	-0.23	0.15	Mínima	Mínima
2	3.22	2.78	3.33	-0.44	0.11	Mínima	Mínima
3	3.34	2.68	3.4	-0.66	0.06	Mínima	Mínima
4	3.45	2.59	3.47	-0.86	0.02	Mínima	Mínima
5	3.57	2.51	3.56	-1.06	-0.01	Moderada	Mínima
10	4.16	2.22	4.09	-1.94	-0.07	Moderada	Mínima
15	4.79	2.14	4.79	-2.65	0	Considerable	Mínima
20	5.44	2.23	5.63	-3.21	0.19	Muy Considerable	Mínima
25	6.13	2.5	6.59	-3.63	0.46	Muy Considerable	Mínima
30	6.84	2.93	7.64	-3.91	0.8	Muy Considerable	Mínima
35	7.59	3.5	8.78	-4.09	1.19	Muy Considerable	Moderada
40	8.36	4.22	9.98	-4.14	1.62	Muy Considerable	Moderada
45	9.17	5.05	11.21	-4.12	2.04	Muy Considerable	Considerable
50	10	6	12.46	-4	2.46	Muy Considerable	Considerable
55	10.87	7.05	13.7	-3.82	2.83	Muy Considerable	Considerable
60	11.76	8.18	14.92	-3.58	3.16	Muy Considerable	Muy Considerable
65	12.69	9.4	16.09	-3.29	3.4	Muy Considerable	Muy Considerable
70	13.64	10.67	17.2	-2.97	3.56	Considerable	Muy Considerable
75	14.63	12	18.21	-2.63	3.58	Considerable	Muy Considerable
80	15.64	13.37	19.11	-2.27	3.47	Considerable	Muy Considerable
85	16.69	14.76	19.89	-1.93	3.2	Moderada	Muy Considerable
90	17.76	16.18	20.51	-1.58	2.75	Moderada	Considerable
95	18.87	17.59	20.96	-1.28	2.09	Moderada	Considerable
100	20	19	21.21	-1	1.21	Mínima	Moderada

Fuente: Elaboración Propia

Figura 20. Rangos de *influencia de RQD mediante recta*



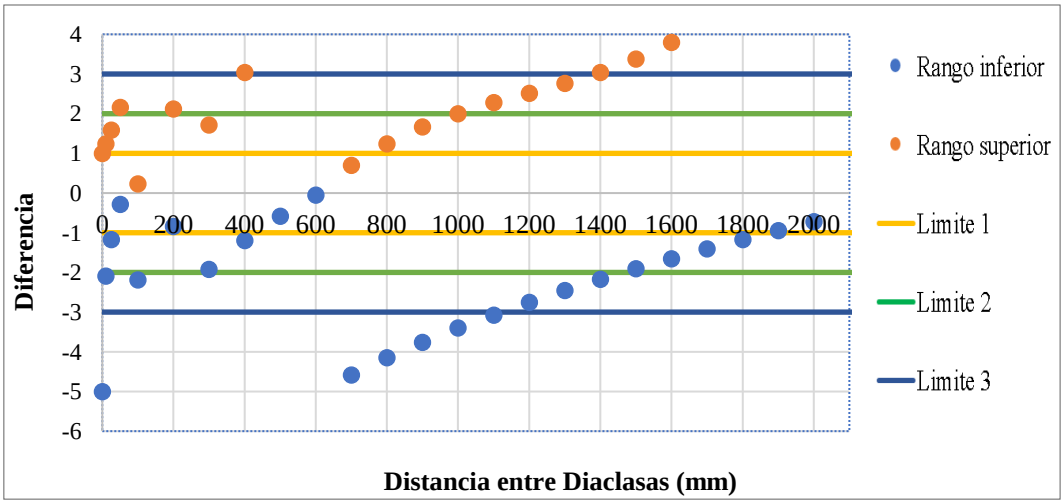
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26. Rangos de influencia de Distancia entre Diaclasas mediante tabla

Distancia entre Diaclasas	Puntaje en la recta	Puntaje mínimo	Puntaje máximo	DmT	DMT	Influencia, límite inferior	Influencia, límite superior
0	5	0	6	-5	1	Muy Considerable	Mínima
10	5	2.91	6.24	-2.09	1.24	Considerable	Moderada
25	5	3.83	6.59	-1.17	1.59	Moderada	Moderada
50	5	4.72	7.16	-0.28	2.16	Mínima	Considerable
100	8	5.81	8.23	-2.19	0.23	Considerable	Mínima
200	8	7.16	10.12	-0.84	2.12	Mínima	Considerable
300	10	8.08	11.72	-1.92	1.72	Moderada	Moderada
400	10	8.81	13.04	-1.19	3.04	Moderada	Muy Considerable
500	10	9.42	14.13	-0.58	4.13	Mínima	Muy Considerable
600	10	9.95	15	-0.05	5	Mínima	Muy Considerable
700	15	10.42	15.7	-4.58	0.7	Muy Considerable	Mínima
800	15	10.85	16.24	-4.15	1.24	Muy Considerable	Moderada
900	15	11.24	16.67	-3.76	1.67	Muy Considerable	Moderada
1000	15	11.6	17	-3.4	2	Muy Considerable	Moderada
1100	15	11.93	17.28	-3.07	2.28	Muy Considerable	Considerable
1200	15	12.25	17.52	-2.75	2.52	Considerable	Considerable
1300	15	12.55	17.77	-2.45	2.77	Considerable	Considerable
1400	15	12.83	18.04	-2.17	3.04	Considerable	Muy Considerable
1500	15	13.1	18.38	-1.9	3.38	Moderada	Muy Considerable
1600	15	13.35	18.8	-1.65	3.8	Moderada	Muy Considerable
1700	15	13.6	19.35	-1.4	4.35	Moderada	Muy Considerable
1800	15	13.83	20.04	-1.17	5.04	Moderada	Muy Considerable
1900	15	14.06	20.92	-0.94	5.92	Mínima	Muy Considerable
2000	15	14.28	22	-0.72	7	Mínima	Muy Considerable

Fuente: Elaboración Propia

Figura 21. Rangos de *influencia de Distancia entre Diaclasas mediante tabla*



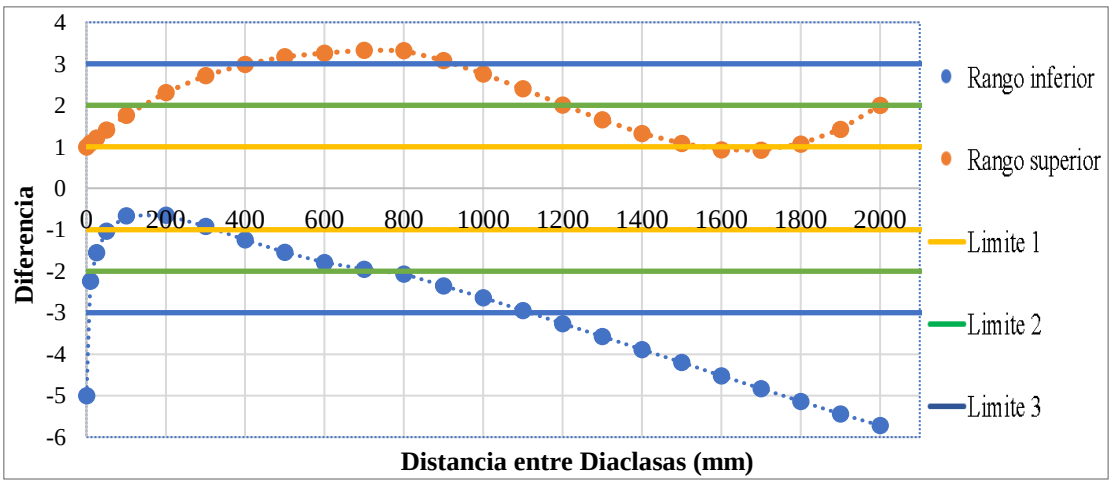
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27. Rangos de influencia de Distancia entre Diaclasas mediante recta

Distancia entre Diaclasas	Puntaje en la recta	Puntaje mínimo	Puntaje máximo	DmR	DMR	Influencia, límite inferior	Influencia, límite superior
0	5	0	6	-5	1	Muy Considerable	Mínima
10	5.15	2.91	6.24	-2.24	1.09	Considerable	Moderada
25	5.38	3.83	6.59	-1.55	1.21	Moderada	Moderada
50	5.75	4.72	7.16	-1.03	1.41	Moderada	Moderada
100	6.47	5.81	8.23	-0.66	1.76	Mínima	Moderada
200	7.81	7.16	10.12	-0.65	2.31	Mínima	Considerable
300	9	8.08	11.72	-0.92	2.72	Mínima	Considerable
400	10.05	8.81	13.04	-1.24	2.99	Moderada	Considerable
500	10.96	9.42	14.13	-1.54	3.17	Moderada	Muy Considerable
600	11.74	9.95	15	-1.79	3.26	Moderada	Muy Considerable
700	12.37	10.42	15.7	-1.95	3.33	Moderada	Muy Considerable
800	12.92	10.85	16.24	-2.07	3.32	Considerable	Muy Considerable
900	13.59	11.24	16.67	-2.35	3.08	Considerable	Muy Considerable
1000	14.24	11.6	17	-2.64	2.76	Considerable	Considerable
1100	14.88	11.93	17.28	-2.95	2.4	Considerable	Considerable
1200	15.51	12.25	17.52	-3.26	2.01	Muy Considerable	Considerable
1300	16.12	12.55	17.77	-3.57	1.65	Muy Considerable	Moderada
1400	16.72	12.83	18.04	-3.89	1.32	Muy Considerable	Moderada
1500	17.3	13.1	18.38	-4.2	1.08	Muy Considerable	Moderada
1600	17.87	13.35	18.8	-4.52	0.93	Muy Considerable	Mínima
1700	18.43	13.6	19.35	-4.83	0.92	Muy Considerable	Mínima
1800	18.97	13.83	20.04	-5.14	1.07	Muy Considerable	Moderada
1900	19.5	14.06	20.92	-5.44	1.42	Muy Considerable	Moderada
2000	20	14.28	22	-5.72	2	Muy Considerable	Moderada

Fuente: Elaboración Propia

Figura 22. Rangos de influencia de Distancia entre Diaclasas mediante recta



Fuente: Elaboración Propia

Conforme lo observado en las tablas y mediante los gráficos la distribución de rangos de influencia se pude resumir en la siguiente tabla.

Tabla 28. Rangos de influencia de cada parámetro

RANGOS DE INFLUENCIA							
Nivel de Influencia	**Rango diferencia**	**RCS**		**RQD**		**Distancia entre Diaclasas**	
		Curva de puntaje mínimo	Curva de puntaje máximo	Curva de puntaje mínimo	Curva de puntaje máximo	Curva de puntaje mínimo	Curva de puntaje máximo
Mínima	$(-1 \leq x \leq 1)$	0	0-26	0-4	0-32	52-326	0-1
		229-250	240-250	100	------	------	1538-1770
Moderada	$(-2 \leq x < -1)$ $(1 < x \leq 2)$	1-25	27-61	5-10	33-44	14-51	2-141
		204-228	204-239	84-99	96-100	327-774	1204-1537
							1771-2000
Considerable	$(-3 \leq x < -2)$ $(2 < x \leq 3)$	26-63	62-203	11-18	45-57	4-13	142-407
		166-203	------	70-83	88-95	775-1119	926-1203
Muy considerable	$(x < -3)$ $(x > 3)$	64-165	------	19-69	58-87	0-3	408-925
		------	------	------	------	1120-2000	------

Fuente: Elaboración Propia

Cabe aclara que la tabla solo considera los rangos de variación respecto a las rectas de referencia de Bieniawski, dado que estas tienen mayor consistencia que los rangos observados en las tablas, los cuales varían múltiples veces de manera brusca, lo que puede generar rangos inconsistentes y demasiado variados, y dado que las metodologías que se desean plantear, tienen como objetivo facilitar el análisis, se consideró poco favorable emplear dichos rangos.

2.3.2. Método de “Influencia media”

Como primer método para determinar RMR mínimo y máximo, en caso de no contar con los medios que faciliten la evaluación precisa mediante el cálculo u observación de los gráficos, se planteó la sumatoria de los valores medios de influencia asignados al valor de cada parámetro, a excepción de la categoría “Muy considerable” en la cual se le asignara un valor de 3 al no poder establecer un valor medio al englobar variaciones mayores a 3 puntos sin límite fijo.

Para evitar cualquier error en este proceso se diseñó una serie de pasos que realizar este método, explicados a continuación:

Paso 1: Determine el valor de RMR del macizo mediante tablas, o curvas de referencia de Bieniawski.

Tabla 29. Caso de ejemplo

Parámetro	Valor	Puntaje
RCS (MPa)	60	7
RQD (%)	60	13
Distancia entre diaclasa (mm)	300	10
Condiciones de las diaclasas	A	26
Condiciones hídricas	D	0
Puntaje Total		56
Clase		III

Fuente: Elaboración Propia

Paso2: Mediante la tabla "Rangos de influencia" identifique la categoría en la que se encuentra el valor de RCS, RQD y distancia entre diaclasas, tanto para las curvas de puntaje mínimo y máximo. Para seguidamente anotar la variación de puntaje correspondiente a la categoría.

Tabla 30. Usa de la tabla "Rangos de influencia de cada parámetro"

RANGOS DE INFLUENCIA							
Nivel de Influencia	**Rango diferencia**	**RCS**		**RQD**		**Distancia entre Diaclasas**	
		Curva de puntaje mínimo	Curva de puntaje máximo	Curva de puntaje mínimo	Curva de puntaje máximo	Curva de puntaje mínimo	Curva de puntaje máximo
Mínima	(-1 ≤ x ≤ 1)	0	0-26	0-4	0-32	52-326	0-1
		229-250	240-250	100	------	------	1538-1770
Moderada	(-2 ≤ x < -1) (1 < x ≤ 2)	1-25	27-61	5-10	33-44	14-51	2-141
		204-228	204-239	84-99	96-100	327-774	1204-1537
							1771-2000
Considerable	(-3 ≤ x < -2) (2 < x ≤ 3)	26-63	62-203	11-18	45-57	4-13	142-407
		166-203	------	70-83	88-95	775-1119	926-1203
Muy considerable	(x < -3) (x > 3)	64-165	------	19-69	58-87	0-3	408-925
		------	------	------	------	1120-2000	------
Variación media		-2.5	1.5	-3	3	-0.5	2.5

Fuente: Elaboración Propia

Paso 3: Realice la sumatoria de los valores determinados.

Tabla 31. Sumatoria de influencia media.

Σ Curva de puntaje mínimo	Σ Curva de puntaje máximo
-2.5	1.5
-3	3
-0.5	2.5
-6	7

Fuente: Elaboración Propia

Paso 4: Sume y reste, respectivamente, los resultados de la sumatoria al RMR calculado originalmente y asigne la clasificación al RMR mínimo y máximo, y registre si hubo o no una reclasificación.

Tabla 32. Resultado del caso de ejemplo, para el método de "Influencia media"

RMR	Puntaje total		Clase	Reclasificación
RMR calculado en Tablas	56		III	------
RMR Mínimo	-6	50	III	No
RMR Máximo	+7	63	II	Si

Fuente: Elaboración Propia

2.3.3. Método de "Evaluación de categorías"

El segundo método planteado, denominado "Evaluación de categorías" a diferencia del primero, se enfoca en las posibles combinaciones de categorías de influencia que se pueden llegar a tener en cada caso.

Cabe añadir que al principio se consideró poco viable este método, ya que, al calcular la cantidad de combinaciones posibles, dado que al tener 4 categorías (n), de las cuales se pueden forman conjuntos de 3 elementos "r", con la posibilidad de repetir categorías en cada conjunto, se obtuvo un total de 64 posibles combinaciones.

Uno de las opciones para lograr evaluar efectivamente dicha cantidad de combinaciones, fue emplear un diagrama de flujo que permita filtrar múltiples combinaciones simultáneamente, para así establecer diferente rango de RMR que puedan verse afectado en su clasificación con determinas combinaciones de influencia. Por

consiguiente, se desarrollaron dos diagramas de flujo, uno para el puntaje máximo y otra para el puntaje mínimo.

De forma general, los diagramas de flujo se conforman de 3 preguntas que permiten filtrar las posibles combinaciones, 4 preguntas para definir si se encuentra en el rango de cambio de clasificación, y 2 segmentos de acción, para indicar si el macizo sube o baja de categoría, además de los respectivos indicadores de inicio y fin del diagrama.

De manera más específica la primera pregunta "¿Dos o más parámetros se clasifican como "Mínima"?" permite filtrar casos donde no se tendría una amplia variación en su puntaje, en caso de tener una respuesta positiva "Si", o separar casos con una variación media o mayor si la respuesta es negativa "No".

El segundo conjunto de preguntas conformado por "¿Algún parámetro tiene una clasificación de "Considerable" o mayor?", en el caso que la primera pregunta sea afirmativa, y "¿Dos o más parámetros se clasifican como "Considerable" o mayor?" para una respuesta inicial negativa, cumplen una función similar a la pregunta de origen, pero con el objetivo de identificar casos con un mayor grado de variación en su puntaje, de otros donde se tendría un cambio moderado.

El tercer conjunto, consta de preguntas que permiten definir si hay o no un cambio en la clasificación para el macizo analizado, dependiendo si su valor de RMR, calculado en tablas, está dentro de alguno de los rangos indicados.

Para definir los rangos en el tercer conjunto de preguntas se planteó la suma o resta, dependiendo de si se desea encontrar el RMR mínimo o máximo respectivamente, entre el valor medio más alto de las posibles combinaciones en cada pregunta y los valores límites de clasificación del RMR (20, 40, 60 y 80), pues de esta manera se establen rangos que abarcan todas las posibles combinaciones que ocasionarían un cambio en la clasificación para un determinado rango de puntajes.

Como ejemplo podemos indicar el cálculo de límites para la pregunta "¿El valor de RMR se encuentra dentro de alguno de estos rangos 16-19, 36-39, 56-59 o 76-79?" resultado de tener dos respuestas positivas consecutivas desde el inicio del flujo para determinar el RMR máximo.

- Primero se determina el valor medio de cada combinación posible para dicha pregunta, que constan de dos conjuntos conformadas por dos categorías "Mínima" y un parámetro variable entre "Considerable" o "Muy considerable":

  - "Mínima" + "Mínima" + "Considerable" = 0.5+0.5+2.5= 3.5
  - "Mínima" + "Mínima" + "Muy considerable" = 0.5+0.5+3= 4

- Se selecciona el valor más alto y se realiza la resta con cada valor límite del RMR.

  - "Valor limite" - "Valor de variación máximo" = "Rango inferior"

20-4=16

40-4= 36

60-4=56

80-4=76

Estos limites inferiores permiten determinar el puntaje mínimo para una reclasificación a una categoría superior, pues es imposible que macizos que han llegado a dicha pregunta con puntajes inferiores a 5 puntos respecto al valor límite superior más cercano, sean reclasificados, ya que, aún con la mejor combinación de parámetros en dicha pregunta solo se le agregaría 4 puntos, quedando a un punto de una hipotética nueva asignación, como se indica con estos ejemplos:

- "Puntaje RMR" + "Valor medio" = RMR Máximo

15+4= 19 sin reclasificación

35+4= 39 sin reclasificación

Y así sucesivamente cada rango.

Para ejemplificar el cálculo de límites para el RMR mínimo se seleccionó la pregunta "¿El valor de RMR se encuentra dentro de alguno de estos rangos 21-26, 41-46, 61-66 o 81-86?" resultado de tener dos respuestas negativas consecutivas desde el inicio del flujo.

- Como en el primer ejemplo se determina el valor medio de cada combinación posible para dicha pregunta, que consta de múltiples combinaciones que poseen como mínimo una categoría "Moderada" indicadas a continuación:

  - "Mínima" + "Moderada" + "Considerable" = 0.5+1.5+2.5= 4.5
  - "Moderada" + "Moderada" + "Moderada" = 1.5+1.5+1.5= 4.5
  - "Mínima" + "Moderada" + "Muy considerable" = 0.5+1.5+3= 5
  - "Moderada" + "Moderada" + "Muy considerable" = 1.5+1.5+3= 6

- Se selecciona el valor más alto y se realiza la suma con cada valor límite del RMR.

  - "Valor limite" + "Valor de la máxima variación" = "Rango superior"

20+6=16

40+6= 36

60+6=56

80+6=76

Siguiendo la misma lógica, estos rangos máximos permiten determinar el puntaje máximo para una reclasificación a una categoría inferior, pues es imposible que macizos que han llegado a dicha pregunta con puntajes superiores a 7 puntos respecto al valor límite inferior más cercano, sean reclasificados, ya que, aún con la mejor combinación de parámetros en dicha pregunta solo se le restarían 6 puntos, como se indica a continuación.

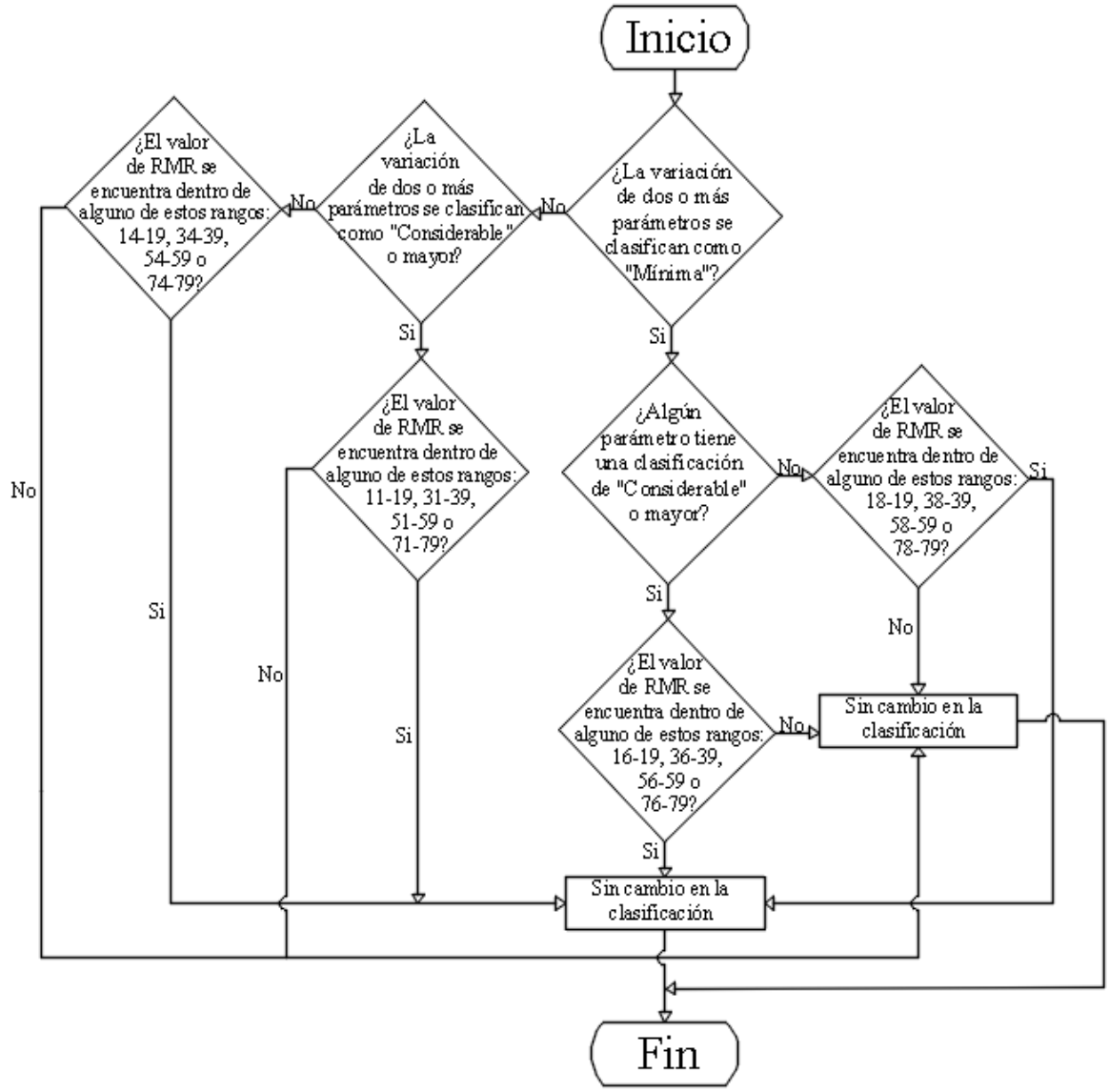
- “Puntaje RMR” - “Valor medio” = RMR Mínimo

27-6= 21 sin reclasificación

47-6= 41 sin reclasificación

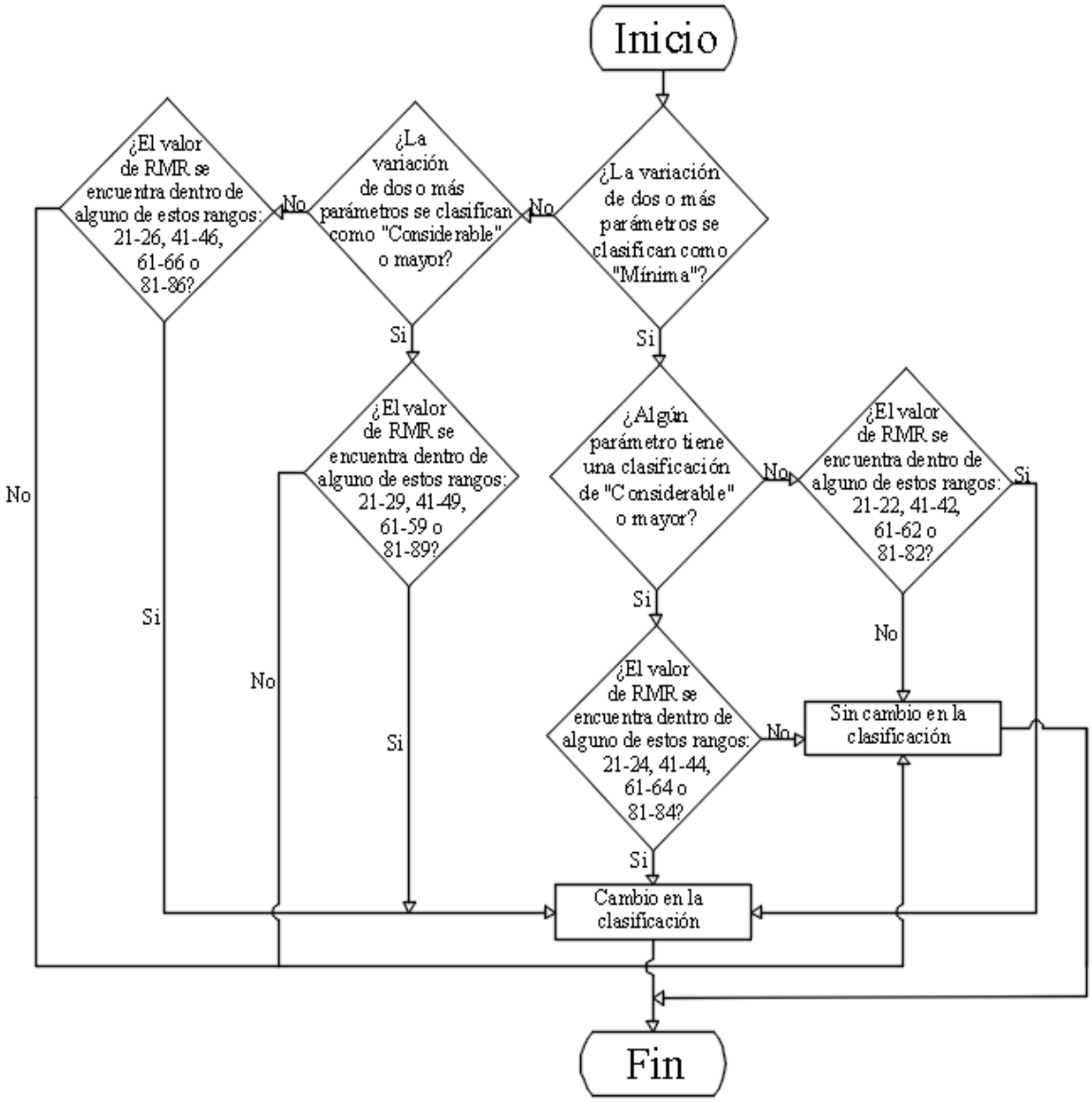
Cabe añadir que en los rangos no se incluyen los valores límites (20, 40,60 y 80) ya que causarían confusión al poder tener dos categorías distintas, dependiendo del criterio del evaluador. Por ejemplo, un valor de 40 puede clasificarse como grado IV (Roca mala) o de grado III (Roca discreta) según el juicio del experto y en un hipotético escenario donde el evaluador decide asignar el grado III al macizo rocoso, y al mismo tiempo consultar una versión del diagrama de flujo que incluya rangos con el valor limite 40, podría malinterpretar que la clasificación del macizo rocoso debe ascender a grado II, cuando en realidad ya se encuentra en su máxima categoría.

Figura 23. Diagrama de flujo para RMR Máximo por el método "Evaluación de categorías"



Fuente: Elaboración Propia

Figura 24. Diagrama de flujo para RMR Mínimo por el método de "Evaluación de categorías"



Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO 3

RESULTADOS

3.1. Uso de las curvas de puntaje mínimo y máximo en la clasificación RMR

Durante esta fase del trabajo, las curvas conseguidas fueron utilizadas para determinar el RMR de 15 casos, dichos datos fueron extraídos de diferentes medios, como documentos, videos, revistas entre otros.

De esta manera obteniendo un total de 3 valores de RMR con su respectiva clasificación, denominados, “RMR en tablas” referente al cálculo con el uso de las tablas de Bieniawski, “RMR Mínimo” y “RMR Máximo” cuyo cálculo utiliza las curvas de puntaje mínimo y máximo respectivamente. Convendría aclarar que no se incluyó el puntaje calculado mediante las rectas de referencia, dado que la diferencia entre el puntaje de RMR calculado con dichos elementos y el obtenido en tablas no es significativa, sin mencionar que el principal medio de evaluación.

Tabla 33. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 1

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	60	7	3.6	8.5
2	RQD (%)	60	13	8.18	14.92
3	Distancia entre diaclasas (mm)	300	10	8.08	12.02
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	A	26	Superficie muy rugosa. Sin separación. Paredes de las diaclasas duras.	
5	Condiciones hidrológicas	D	0	> 125 Litros/min > 0.5 Problemas de agua graves	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	56	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR mínimo	45.86	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR máximo	61.44	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 34. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 2

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	35	4	2.1	5.68
2	RQD (%)	55	13	7.05	13.7
3	Distancia entre diaclasas (mm)	300	10	8.08	12.02
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	C	12	Superficie ligeramente rugosa. Separación < 1mm Paredes de las diaclasas suaves	
5	Condiciones hidrológicas	C	4	25 - 125 Litros/min 0.2 - 0.5 Presión moderada	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	43	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR mínimo	33.23	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR máximo	47.4	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 35. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 3

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	100	7	6	12.1
2	RQD (%)	75	13	12	18.21
3	Distancia entre diaclasas (mm)	1200	15	12.25	18.72
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	B	20	Superficie ligeramente rugosa.	
				Separación < 1mm	
				Paredes de las diaclasas duras.	
5	Condiciones hidrológicas	D	0	> 125 Litros/min	
				> 0.5	
				Problemas de agua graves	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	55	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR mínimo	50.25	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR máximo	69.03	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 36. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 4

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	80	7	4.8	10.44
2	RQD (%)	40	6	4.22	9.98
3	Distancia entre diaclasas (mm)	150	8	6.56	9.36
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	C	12	Superficie ligeramente rugosa. Separación < 1mm Paredes de las diaclasas suaves	
5	Condiciones hidrológicas	D	0	> 125 Litros/min > 0.5 Problemas de agua graves	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	33	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR mínimo	27.58	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR máximo	41.78	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 5

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	40	4	2.4	6.28
2	RQD (%)	25	6	2.5	6.59
3	Distancia entre diaclasas (mm)	50	5	4.72	7.21
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	E	0	Superficie resbalosa Relleno con espesor > 5mm o abertura > 5mm Diaclasas continuas	
5	Condiciones hidrológicas	B	7	< 25 Litros/min 0 - 0.2 Húmedo	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	22	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR mínimo	16.62	V	Pernos sistemáticos de 5 a 6 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	150 - 200 mm en el techo, 150 mm en las paredes y 50 mm en el frente	Marcos medianos a pesados espaciados de 0.75 m con estacas y jaula ardilla donde se necesite
RMR máximo	27.08	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 38. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 6

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	175	12	10.5	15.83
2	RQD (%)	90	17	16.18	20.51
3	Distancia entre las diaclasas (mm)	1800	15	13.83	21.84
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	A	26	Superficie muy rugosa. Sin separación. Paredes de las diaclasas duras.	
5	Condiciones hidrológicas	A	10	0 litros/min 0 Completamente seco	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	80	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----
RMR mínimo	76.51	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----
RMR máximo	94.18	I	No necesita ademe excepto algunos pernos para refuerzo local	-----	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 39. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 7

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	60	7	3.6	8.5
2	RQD (%)	70	13	10.67	17.2
3	Distancia entre las diaclasas (mm)	900	15	11.24	17.57
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	B	20	Superficie ligeramente rugosa.	
				Separación < 1mm	
				Paredes de las diaclasas duras.	
5	Condiciones hidrológicas	D	0	> 125 Litros/min	
				> 0.5	
				Problemas de agua graves	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	55	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR mínimo	45.51	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR máximo	63.27	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 8

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	22	2	1.32	4.04
2	RQD (%)	10	3	2.22	4.09
3	Distancia entre diaclasas (mm)	100	8	5.81	8.33
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	D	8	Superficie resbalosa Relleno con espesor < 8mm Diaclasas continuas	
5	Condiciones hidrológicas	C	4	25 - 125 Litros/min 0.2 - 0.5 Presión moderada	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	25	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR mínimo	21.35	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR máximo	28.46	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 41. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 9

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	45	4	2.7	6.86
2	RQD (%)	80	17	13.37	19.11
3	Distancia entre diaclasas (mm)	1700	15	13.6	21.05
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	B	20	Superficie ligeramente rugosa. Separación < 1mm Paredes de las diaclasas duras.	
5	Condiciones hidrológicas	B	7	< 25 Litros/min 0 - 0.2 Húmedo	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	63	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----
RMR mínimo	56.67	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR máximo	74.02	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 42. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 10

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	70	7	4.2	9.51
2	RQD (%)	75	13	12	18.21
3	Distancia entre diaclasas (mm)	1500	15	13.1	19.88
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	C	12	Superficie ligeramente rugosa. Separación < 1mm Paredes de las diaclasas suaves	
5	Condiciones hidrológicas	A	10	0 litros/min 0 Completamente seco	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	57	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR mínimo	51.3	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR máximo	69.6	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 43. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 11

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	18	2	1.08	3.51
2	RQD (%)	30	6	2.93	7.64
3	Distancia entre diaclasas (mm)	200	8	7.16	10.32
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	E	0	Superficie resbalosa	
				Relleno con espesor > 5mm o abertura > 5mm	
				Diaclasas continuas	
5	Condiciones hidrológicas	D	0	> 125 Litros/min	
				> 0.5	
				Problemas de agua graves	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	16	V	Pernos sistemáticos de 5 a 6 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	150 - 200 mm en el techo, 150 mm en las paredes y 50 mm en el frente	Marcos medianos a pesados espaciados de 0.75 m con estacas y jaula ardilla donde se necesite
RMR mínimo	11.17	V	Pernos sistemáticos de 5 a 6 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	150 - 200 mm en el techo, 150 mm en las paredes y 50 mm en el frente	Marcos medianos a pesados espaciados de 0.75 m con estacas y jaula ardilla donde se necesite
RMR máximo	21.47	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 44. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 12

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	200	12	12	16.2
2	RQD (%)	85	17	14.76	19.89
3	Distancia entre diaclasas (mm)	500	10	9.42	14.63
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	B	20	Superficie ligeramente rugosa. Separación < 1mm Paredes de las diaclasas duras.	
5	Condiciones hidrológicas	D	0	> 125 Litros/min > 0.5 Problemas de agua graves	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	59	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR mínimo	56.18	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR máximo	70.72	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 13

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	130	12	7.8	14.07
2	RQD (%)	92	20	16.74	20.71
3	Distancia entre diaclasas (mm)	1900	15	14.06	22.82
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	A	26	Superficie muy rugosa. Sin separación. Paredes de las diaclasas duras.	
5	Condiciones hidrológicas	A	10	0 litros/min 0 Completamente seco	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	83	I	No necesita ademe excepto algunos pernos para refuerzo local	-----	-----
RMR mínimo	74.6	II	Pernos locales en el techo de 3m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	-----
RMR máximo	93.6	I	No necesita ademe excepto algunos pernos para refuerzo local	-----	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 46. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 14

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	40	4	2.4	6.28
2	RQD (%)	50	6	6	12.46
3	Distancia entre diaclasas (mm)	300	10	8.08	12.02
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	C	12	Superficie ligeramente rugosa. Separación < 1mm Paredes de las diaclasas suaves	
5	Condiciones hidrológicas	D	0	> 125 Litros/min > 0.5 Problemas de agua graves	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	32	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR mínimo	28.48	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR máximo	42.76	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 47. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, Caso 15

Parámetro		Valor	Puntaje en tablas	Puntaje mínimo	Puntaje máximo
1	RCS(MPa)	18	2	1.08	3.51
2	RQD (%)	60	13	8.18	14.92
3	Distancia entre diaclasas (mm)	800	15	10.85	17.04
Parámetro		Categoría	Puntaje en tablas	Descripción	
4	Condiciones de las diaclasas	D	8	Superficie resbalosa Relleno con espesor < 8mm Diaclasas continuas	
5	Condiciones hidrológicas	C	4	25 - 125 Litros/min 0.2 - 0.5 Presión moderada	
RMR	Suma total	Clasificación	Fortificación		
RMR en tablas	42	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----
RMR mínimo	32.11	IV	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	100 - 150 mm en el techo, 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde hagan falta
RMR máximo	47.47	III	Pernos sistemáticos de 4 m de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50 - 100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	-----

Fuente: Elaboración Propia

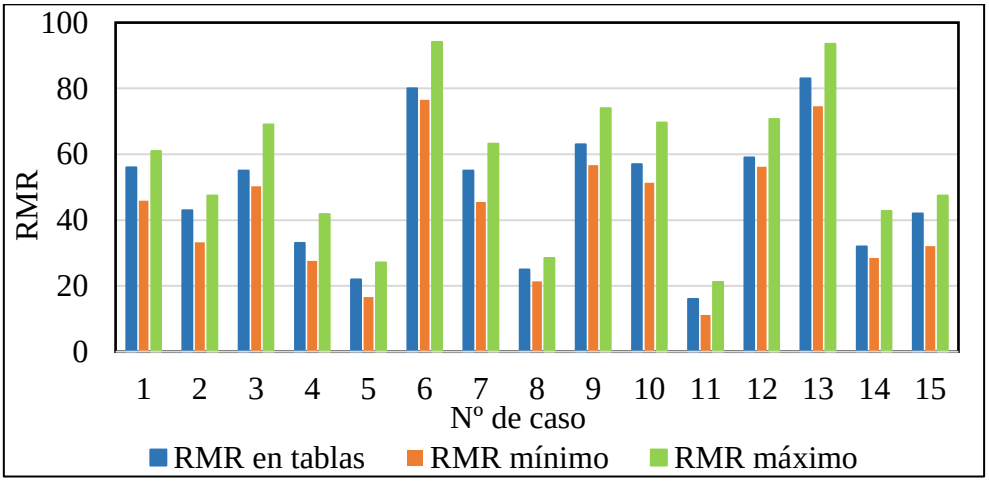
De los 15 casos analizados, el 60% de ellos cambian a una clasificación mejor a la asignada mediante tablas indicando una menor necesidad de fortificación, el 33.33% decrece en su clasificación a una peor, y el 6.67% no presenta ningún cambio en clasificación.

Tabla 48. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo, resumen de resultados

Caso	RMR en Tablas		RMR Mínimo		Reclasificación	RMR Máximo		Reclasificación
1	56	III	45.86	III	No	61	II	Si
2	43	III	33.23	IV	Si	47.4	III	No
3	55	III	50.25	III	No	69.03	II	Si
4	33	IV	27.58	IV	No	41.78	III	Si
5	22	IV	16.62	V	Si	27.08	IV	No
6	80	II	76.51	II	No	94.18	I	Si
7	55	III	45.51	III	No	63.17	II	Si
8	25	IV	21.35	IV	No	28.46	IV	No
9	63	II	56.67	III	Si	74.02	II	No
10	57	III	51.3	III	No	69.6	II	Si
11	16	V	11.17	V	No	21.17	IV	Si
12	59	III	56.18	III	No	70.72	II	Si
13	83	I	74.6	II	Si	93.6	I	No
14	32	IV	28.48	IV	No	42.76	III	Si
15	42	III	32.11	IV	Si	47.47	III	No

Fuente: Elaboración Propia

Figura 25. Resumen de variación de puntaje de los casos analizados



Fuente: Elaboración Propia

De los 15 casos analizados, 9 de ellos, el 60%, presentan un aumento en su clasificación RMR, al aplicar las curvas de puntaje máximo. En cambio, 6 de los casos, el 33.33%, muestran un descenso en su clasificación a causa de las curvas de RMR mínimo, y solo 1 de los casos, el 6.67%, no posee variación en su clasificación, independientemente de la curva con la que se evalué.

Estos resultados indican que la aplicación de curvas de puntaje mínimo y máximo, puede influir en la evaluación geotécnica del macizo rocoso. Particularmente, en más de la mitad de los casos, asignando una mejor categoría al macizo, lo que podría derivar en diseños de sostenimiento menos costosos, brindando una reducción en los costes de fortificaciones.

Este comportamiento puede atribuirse a que, en promedio, el valor de RMR obtenido mediante las curvas de puntaje máximo, es 8.78 puntos mayor al calculado mediante tablas, valor que aparentemente es más que suficiente para considerar una reclasificación del macizo rocoso a una categoría superior, en más de la mitad de los casos analizados.

Por otro lado, la menor influencia de las curvas de puntaje mínimo para una reclasificación, se debe a que la reducción, en promedio, del puntaje final es de apenas -5.4 puntos, valor que no sería lo sufrientemente alto para provocarla reclasificación.

Tabla 49. Promedio de variación de RMR Mínimo y Máximo

Caso	Reducción de puntaje	Aumento de puntaje
1	-10.14	5
2	-9.77	4.4
3	-4.75	14.03
4	-5.42	8.78
5	-5.38	5.08
6	-3.49	14.18
7	-9.49	8.17
8	-3.65	3.46
9	-6.33	11.02
10	-5.7	12.6
11	-4.83	5.17
12	-2.82	11.72
13	-8.4	10.6
14	-3.52	10.76
15	-9.89	5.47
Promedio	-5.42	8.78

Fuente: Elaboración Propia

3.2. Resultados de las guías para la clasificación mínima y máxima del RMR sin medios de cálculo preciso

Para verificar la efectividad de las metodologías propuestas, se reutilizaron los datos de los casos anteriormente, los cuales fueron procesados mediante ambas metodologías, para de este modo determinar el porcentaje de acierto en la reclasificación de un macizo rocoso e instancias donde muestren irregularidades.

Tabla 50. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo por el método de "Influencia media", resumen de resultados I

Caso	RMR EN TABLAS		RMR Mínimo		Cambia de clasificación	RMR Máximo		Cambia de clasificación
1	56	III	50	III	No	63	II	Si
2	43	III	37	IV	Si	49.5	III	No
3	55	III	46.5	III	No	63	II	Si
4	33	IV	26.5	IV	No	39.5	IV	No
5	22	IV	15	V	Si	25.5	IV	No
6	80	II	73	II	No	86.5	I	Si
7	55	III	47.5	III	No	62.5	II	Si
8	25	IV	21.5	IV	No	27.5	IV	No
9	63	II	55	III	Si	68	II	No
10	57	III	48.5	III	No	63	II	Si
11	16	V	11	V	No	19.5	V	No
12	59	III	53.5	III	No	67.5	II	Si
13	83	I	75.5	II	Si	89.5	I	No
14	32	IV	28.5	IV	No	38.5	IV	No
15	42	III	36.5	IV	Si	48.5	III	No

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 51. Cálculo de RMR Mínimo y Máximo por el método de "Influencia media", resumen de resultados II

Caso	RMR Mínimo		RMR Máximo	
	Mediante curvas	Influencia media	Mediante curvas	Influencia media
1	III	III	II	II
2	IV	IV	III	III
3	III	III	II	II
4	IV	IV	III	IV
5	V	V	IV	IV
6	II	II	I	I
7	III	III	II	II
8	IV	IV	IV	IV
9	III	III	II	II
10	III	III	II	II
11	V	V	IV	V
12	III	III	II	II
13	II	II	I	I
14	IV	IV	III	IV
15	IV	IV	III	III

Fuente: Elaboración Propia

El primer método, influencia media, presentó un 100% de concordancia en la clasificación de RMR mínimo con respecto al calculado mediante la ecuación de la recta. No obstante, en el caso del RMR máximo, se observó que el 20% de los casos (Caso 4, 11 y 14), la categoría del macizo no se reclasificó, ya que la sumatoria de valores medios

era insuficiente para considerar el ascenso de la categoría, y permaneció en su clasificación original.

Tabla 52. Resultados del método "Evaluación de categorías" para el RMR Mínimo

Evaluación de categorías de RMR Mínimo						
Caso	RCS	RQD	DED	Combinación	Reclasificación mediante Evaluaciones de categorías	Reclasificación mediante curvas
1	Moderado	Muy considerable	Considerable	OVC	No	No
2	Moderado	Considerable	Considerable	OCC	Si	Si
3	Considerable	Muy considerable	Considerable	CVC	No	No
4	Considerable	Moderado	Considerable	COC	No	No
5	Moderado	Mínimo	Moderado	OMO	Si	Si
6	Considerable	Considerable	Moderado	CCO	No	No
7	Moderado	Muy considerable	Muy considerable	OVV	No	No
8	Mínimo	Mínimo	Moderado	MMO	No	No
9	Moderado	Muy considerable	Mínimo	OVM	Si	Si
10	Considerable	Muy considerable	Mínimo	CVM	No	No
11	Mínimo	Mínimo	Considerable	MMC	No	No
12	Considerable	Muy considerable	Muy considerable	CVV	No	No
13	Considerable	Considerable	Moderado	CCO	Si	Si
14	Moderado	Considerable	Considerable	OCC	No	No
15	Mínimo	Muy considerable	Muy considerable	MVV	Si	Si

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 53. Resultados del método "Evaluación de categorías" para el RMR Máximo

Evaluación de categorías de RMR Máximo						
Caso	RCS	RQD	DED	Combinación	Reclasificación mediante Evaluaciones de categorías	Reclasificación mediante curvas
1	Moderado	Muy considerable	Considerable	OVC	No	No
2	Moderado	Considerable	Considerable	OCC	Si	Si
3	Considerable	Muy considerable	Considerable	CVC	No	No
4	Considerable	Moderado	Considerable	COC	No	No
5	Moderado	Mínimo	Moderado	OMO	Si	Si
6	Considerable	Considerable	Moderado	CCO	No	Si
7	Moderado	Muy considerable	Muy considerable	OVV	No	No
8	Mínimo	Mínimo	Moderado	MMO	No	No
9	Moderado	Muy considerable	Mínimo	OVM	Si	Si
10	Considerable	Muy considerable	Mínimo	CVM	No	No
11	Mínimo	Mínimo	Considerable	MMC	No	No
12	Considerable	Muy considerable	Muy considerable	CVV	No	No
13	Considerable	Considerable	Moderado	CCO	Si	Si
14	Moderado	Considerable	Considerable	OCC	No	No
15	Mínimo	Muy considerable	Muy considerable	MVV	Si	Si

Fuente: Elaboración Propia

Mediante la segunda metodología, diagramas de flujo, se observa una mayor consistencia en los resultados del puntaje máximo, que, si bien presenta un error, caso número 6, equivalente al 6.67% de los casos evaluados, esto se puede explicar dado que dicho caso tiene un puntaje límite, puntaje de 80 calculado en tablas, donde se le pueden

asignar dos categorías, y a criterio personal se le asigno la menor categoría posible, categoría II, y mediante el cálculo preciso con las curva de puntaje máximo se le dio una categoría mayor, categoría I, siendo que otros profesionales determinarían desde el cálculo en tablas que el macizo en cuestión es de categoría I, evitando la discordancia de respuestas entre esta metodología y el cálculo mediante curvas, ya que no hay cambio de clasificación como indica la metodología planteada.

CONCLUSIONES

- Las rectas determinadas para el puntaje mínimo y máximo correspondientes al parámetro RCS son:

$$Puntaje\ mínimo = 0.06 * RCS$$

$$Puntaje\ máximo = -0.00035 * RCS^2 + 0.146 * RCS + 1$$

Para el parámetro RQD son:

$$Puntaje\ mínimo = -0.000016 * RQD^3 + 0.0044RQD^2 - 0.12RQD + 3$$

$$Puntaje\ máximo = -0.000028 * RQD^3 + 0.0041RQD^2 + 0.05RQD + 3.21$$

Y para el parámetro de distancia entre diaclasas son:

$$Puntaje\ mínimo = 1.46 * DED^{0.3}$$

$$Puntaje\ máximo = 0.000000005DED^3 - 0.000018DED^2 + 0.024DED + 6$$

- En el 93,33% de los casos analizados se evidenció una reclasificación del macizo rocoso, ya sea para una categoría superior o inferior, lo que resalta la importancia de evaluar tanto el RMR Mínimo como el RMR Máximo para obtener un rango más completo y preciso de las necesidades de fortificación.

- Las curvas de puntaje máximo revelan que el 60% de los casos evaluados presenta un ascenso en su clasificación RMR, indicando una mejor calidad del macizo rocoso, por ende, una menor necesidad en su fortificación. En contraste, el 33.33% de los casos presenta un descenso en su clasificación, señalando mayores labores de sostenimiento. El 6,67% restante, no muestra variaciones en su clasificación lo cual asegura la calidad del macizo, permitiendo establecer claramente el tipo y características de fortificación.

- Se determinó que, en promedio, las curvas de puntaje máximo incrementan el valor del RMR final en 8.78 puntos. Por otro lado, las curvas de puntaje mínimo reducen el puntaje en un promedio de 5.42 puntos.

- Los métodos de “Influencia Media” y el de “Evaluación de Categorías”, han demostrado una concordancia del 100% en la determinación del RMR mínimo en todos los casos analizados. Esta consistencia respalda su validez como herramientas fiables para la estimación de dicho parámetro, en caso de no contar con los medios que permitan el cálculo preciso mediante las respectivas curvas.

- Para el cálculo de la clasificación del RMR Máximo, mediante los métodos mencionados anteriormente, se evidencio más del 70% de coincidencia, lo que indica una buena correlación como metodologías para establecer este parámetro.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda no omitir ninguna de las curvas, tanto para puntaje mínimo como máximo, a fin de garantizar una evaluación más precisa, del RMR Mínimo y Máximo.
- Se recomienda considerar el RMR Mínimo y Máximo como un complemento del RMR obtenido mediante el método tradicional de tablas, ya que su integración permite enriquecer el análisis geomecánico del macizo rocoso, mejorando la toma de decisiones en cuanto al diseño del sostenimiento refiere.
- Se recomienda el uso del método “Evaluación de categorías”, para determinar el puntaje de RMR Máximo, dado que tiene un mayor porcentaje de aciertos que el método “Influencia media”
- Se recomienda usar las ilustraciones 18, 20 y 22, para determinar la categoría de influencia, en caso de no contar con la tabla 28.
- Se recomienda realizar estudios complementarios con una base de datos más amplia, para validar y perfeccionar las tendencias de reclasificación observadas en este análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aparicio, A. H., & Velasco, R. A. (2017). Guía De Criterios Geomecánicos Para Diseño, Construcción, Supervisión Y Cierre De Labores Subterráneas. Lima: Osinergmin.

Carrasco, S. N., Gómez, R. P., & Marín, J. A. (2003). *Geotecnia aplicada a la construcción de túneles.* Catalunya: Universidad Politécnica de Cartagena.

Castillo, J. C. (2014). *Tipos de Fortifcación.* Scribd: https://es.scribd.com/doc/269670426/Tipos-de-Fortificacion

Cook, J. (2016). La geomecánica. *Oilfield Review*, *28*(1), 1-3.

Deere, U., & Deere, W. (1988). *The Rock Quality Designation (RQD) index in practice.* Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Díez, A. G., & Cedrún, P. M. (2022). *Caracterización geomecánica de suelos y rocas.* https://ocw.unican.es/course/view.php?id=304&section=2

E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C. (2017). *El Sostenimiento De Túneles Basado En Las Clasificaciones Geomecánicas.* Barcelona: ETSECCPB-UPC publicaciones.

Escobar, G. D. (2016). *Manual De Geoliga Para Ingenieros.* Bogota : Universidad de Colombia.

Feijo, P. (1996). *Manual de Mecánica de Rocas y Estabilidad de Taludes y Túneles.* Cuenca: Universidad del Azuay.

Gonzales de Vallejo, L. (1983). *A new classification system for underground* (Vol. 1). Lisboa: LNEC.

Guyer, J. P. (2020). *Una Introducción a los Materiales de Hormigón Proyectado: An Introduction to Shotcrete Materials.* California: The ClubHouse Press El Macero.

Herbert, J. H., Gómez, J. C., & Muñoz, L. D. (2018). Construcción de infraestructura de mina en interior. *Introducción a la minería subterránea*, *3*, 74-77.

Jiménez, A. N. (2006). Caracterización Geomecánica De Macizos Rocosos En Obras Subterráneas. *Minería y Geología, 22*(3), 8-9.

Laboratorio Oficial J. M. Madariaga . (2015). *Guía sobre control geotécnico en minería subterránea.* spaña: Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

Latorre, J., & Contreras, H. (1994). Fostificación de minas. *Formación de expertos en seguridad minera, 5*, 13-19.

Massaro, A. S. (2018). *Exploración y desarrollo de proyectos.* Obtenido de https://www.iapg.org.ar/conexplo/geomecanica.html

Menéndez, M. M. (2009). *Clasificaciones geomecánicas en rocas volcánicas.* Madrid: CEDEX.

Oyanguren, P. R., & Monge, L. A. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de taludes* . Madrid: Red DESIR.

Pérez, Á. D. (2013). Correlaciones Entre Las Clasificaciones Geomecánicas Q Y Rmr En El Tunel Exploratorio De “La Linea”, Cordillera Central De Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra, 34*, 42-50.

República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (2003). *GLOSARIO TÉCNICO MINERO.* Bogotá: INGEOMINAS .

Rodrigo A. Díaz, Y. L. (2023). Correlación entre RQD y otras propiedades geomecánicas de rocas subvolcánicas en túneles exploratorios del distrito minero Chépica, región del Maule, Chile. *Mecánica de Rocas*, 2-3.

Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía Perú. (2004). *Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea.* Lima: Cia. Minera Ares S.A.C.

Torres, F. A. (2021). *Sectorización Geomecánica y Comportamiento Dinámico Nuevo Túnel El Melón II.* Viña del Mar : Universidad Andrés Bello.

Vargas, J. M. (2019). *Clasificación geomecánia de las rocas.* Cajamarca: Escuela Académico Profesional De Ingeniería Hidráulica.