

**CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO
ROCOSO EN EL NIVEL VEINTIUNO DE LA MINA LA MARUJA (DISTRITO
MINERO DE MARMATO, CALDAS) PARA ESTIMAR LAS RECOMENDACIONES
DE ESTABILIDAD Y SOPORTE EN LA EXCAVACIÓN Y SU CORRELACIÓN CON
LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES**

BLANCA LUZ BETANCUR ARENAS

CARLOS EDUARDO LÓPEZ BALAGUERA

ESCUELA DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

UNIVERSIDAD EAFIT

MEDELLÍN

2019

**CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO
ROCOSO EN EL NIVEL VEINTIUNO DE LA MINA LA MARUJA (DISTRITO
MINERO DE MARMATO, CALDAS) PARA ESTIMAR LAS RECOMENDACIONES
DE ESTABILIDAD Y SOPORTE EN LA EXCAVACIÓN Y SU CORRELACIÓN CON
LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES**

BLANCA LUZ BETANCUR ARENAS

CARLOS EDUARDO LÓPEZ BALAGUERA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de geólogo(a)

Asesor

Edgar Alland Sáenz Mateus

ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN

2019

AGRADECIMIENTOS

Un sentido agradecimiento a mi madre, hermana y en especial a mi hermano Nevardo porque me permitieron y me motivaron para estar en este proceso de aprendizaje.

A Edgar Alland Sáenz Mateus, nuestro asesor, por ser una luz guía en todo momento durante el desarrollo de este proyecto de grado.

A Víctor Flórez por permitir amablemente tanto el acceso a la mina como el facilitarnos información de ésta.

A mi compañero de tesis Carlos López Balaguera por su indudable compromiso y sus grandes aportes en el tema.

Finalmente, a todos los que me apoyaron en este proceso.

Blanca Betancur Arenas

Agradezco de corazón a mis padres, por apoyar toda mi carrera profesional desde antes de haberla comenzado, por los esfuerzos económicos y por el tiempo que me dedicaron para culminar mi formación como profesional.

A nuestro profesor Edgar Alland Sáenz que fue la persona que creyó y vio potencial en nuestro proyecto de grado y dedicó parte de su tiempo para guiarnos y compartir sus conocimientos.

A Ober de Jesús Ayala y a José Luis Vinasco porque fueron las personas que me enseñaron y me dieron la idea para emprender este tema como proyecto de grado además de suministrar la información crucial para desarrollarlo.

A mi compañera Blanca Betancur Arenas por estar siempre atenta y comprometida en este, nuestro proyecto, y aportar gran parte de sus conocimientos para el buen desarrollo del mismo.

Y, por último, a todas aquellas personas que aportaron un granito de arena para culminar este proceso.

Carlos Eduardo López Balaguera

Resumen

El conocimiento de las propiedades geomecánicas de la roca resulta fundamental para la estabilidad de una excavación y, por ende, para la seguridad de las labores mineras. Para ello, existen diferentes metodologías que cuantifican la calidad del macizo rocoso y permiten adaptar o recomendar el soporte según las características específicas del macizo. A partir del levantamiento de las discontinuidades del macizo rocoso en el nivel veintiuno de la mina La Maruja ubicado en Marmato, Caldas, en el presente trabajo se realiza una clasificación geomecánica por medio de las metodologías RMR de Bieniawski (1989) y el sistema Q de Barton, Lien y Lunde (1974) y un análisis cinemático de cuñas con el fin de estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte. Adicionalmente, dado que la alteración hidrotermal produce cambios físicos y químicos en la roca, se realiza una evaluación del efecto de las alteraciones hidrotermales presentes en la calidad del macizo rocoso (alteración propilítica y alteración argílica intermedia). Esta evaluación se hace de forma independiente para roca encajante y zonas mineralizadas. Al correlacionar la clasificación obtenida con la interacción roca-fluido, se estima que sí existe una influencia significativa en la calidad del macizo rocoso. Para el caso objeto de estudio, se le atribuye mayor implicación a la alteración argílica caracterizada por sericita que a la alteración argílica de esmectita. Además, se infiere que para las zonas clasificadas con baja calidad el comportamiento de la alteración fue más pervasivo que en las zonas de mayor calidad.

Palabras clave: Alteración hidrotermal, clasificación geomecánica con Sistema Q y metodología RMR, discontinuidades, macizo rocoso, roca encajante.

Tabla de contenido

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Pregunta problema..... | 1 |
| 1.2 Hipótesis..... | 2 |
| 1.3 Objetivos..... | 2 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 2 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.4 Metodología..... | 3 |
| 1.4.1 Recopilación de información y planeación del trabajo de campo..... | 3 |
| 1.4.2 Fase de campo..... | 4 |
| 1.4.3 Fase posterior al trabajo de campo..... | 4 |
| 2. Marco teórico..... | 5 |
| 2.1 Localización..... | 5 |
| 2.2 Geología regional..... | 6 |
| 2.2.1 Litología..... | 7 |
| 2.2.1.1 Rocas metamórficas..... | 7 |
| 2.2.1.2 Rocas ígneas..... | 8 |
| 2.2.1.3 Rocas sedimentarias..... | 8 |
| 2.2.2 Geología estructural..... | 9 |
| 2.3 Geología local del yacimiento..... | 10 |
| 2.3.1 Características geológicas del depósito..... | 12 |
| 2.4 Sistemas de clasificación geomecánica de macizos rocosos..... | 13 |
| 2.4.1 Rock Mass Rating (RMR)..... | 14 |
| 2.4.1.1 Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)..... | 14 |
| 2.4.1.1.1 Martillo de Schmidt..... | 15 |
| 2.4.1.2 RQD..... | 16 |
| 2.4.1.3 Espaciamiento de las discontinuidades..... | 17 |
| 2.4.1.4 Agua subterránea..... | 17 |
| 2.4.1.5 Condición de las discontinuidades..... | 17 |
| 2.4.1.5.1 Persistencia..... | 17 |
| 2.4.1.5.2 Apertura..... | 17 |
| 2.4.1.5.3 Rugosidad..... | 17 |
| 2.4.1.5.4 Relleno..... | 17 |
| 2.4.1.5.5 Alteración..... | 18 |
| 2.4.2 Sistema Q..... | 19 |
| 2.5 Análisis de cuñas..... | 26 |
| 3. Resultados..... | 29 |
| 3.1 Resistencia de la roca intacta..... | 29 |
| 3.2 Caracterización de las discontinuidades..... | 37 |

| | |
|-----------------------------------------------|------------|
| 3.2.1 Roca encajante..... | 37 |
| 3.2.1.1 Tendencias estructurales..... | 37 |
| 3.2.1.2 Alteración..... | 42 |
| 3.2.1.3 Persistencia..... | 42 |
| 3.2.1.4 Abertura..... | 43 |
| 3.2.1.5 Rugosidad..... | 44 |
| 3.2.1.6 Relleno..... | 44 |
| 3.2.1.7 Comportamiento del agua..... | 45 |
| 3.2.2 Zonas mineralizadas..... | 46 |
| 3.2.2.1 Tendencias estructurales..... | 47 |
| 3.2.2.2 Alteración..... | 52 |
| 3.2.2.3 Persistencia..... | 53 |
| 3.2.2.4 Abertura..... | 54 |
| 3.2.2.5 Rugosidad..... | 55 |
| 3.2.2.6 Relleno..... | 55 |
| 3.2.2.7 Comportamiento del agua..... | 56 |
| 3.3 Clasificación del macizo rocoso..... | 57 |
| 3.3.1 Roca encajante..... | 60 |
| 3.3.1.1 Variaciones en el RMR..... | 60 |
| 3.3.1.2 Variaciones en el Q..... | 64 |
| 3.3.2 Zonas mineralizadas..... | 66 |
| 3.3.2.1 Variaciones en el RMR..... | 66 |
| 3.3.2.2 Variaciones en el Q..... | 69 |
| 3.4 Análisis cinemático de cuñas..... | 72 |
| 3.4.1 Zonas mineralizadas..... | 72 |
| 3.4.2 Roca encajante..... | 103 |
| 4. Discusión..... | 120 |
| 5. Conclusiones y recomendaciones..... | 124 |
| 5.1 Conclusiones..... | 124 |
| 5.2 Recomendaciones..... | 126 |
| Referencias | 127 |

Índice de figuras

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Sección transversal del yacimiento de oro de Marmato con aspecto NW que muestra las intrusiones P1 a P5. Fuente: Gran Colombia Gold (2017). ----- | 2 |
| Figura 2. Metodología para el desarrollo del trabajo de grado. Fuente: Elaboración propia. ----- | 5 |
| Figura 3. 1-A Ubicación del departamento de Caldas en Colombia. 1-B Ubicación del municipio de Marmato en Caldas. Fuente: elaboración propia a partir de Wikipedia Commons (2012). Caldas. Recuperado de https://bit.ly/1L8nrhN ----- | 6 |
| Figura 4. Geología regional. Tomado y modificado de la Plancha 186 Riosucio y Plancha 187 Salamina [versión digital]. Servicio Geológico Colombiano, 2009----- | 7 |
| Figura 5. Geología local. Tomada y modificada del mapa aportado por Gran Colombia Gold (2017b).----- | 11 |
| Figura 6. Esquema depósito de Marmato. Fuente: Gran Colombia Gold (2017a, p. 29). ----- | 12 |
| Figura 7. Sección transversal del yacimiento de oro de Marmato con aspecto NW que muestra las intrusiones P1 a P5. Fuente: Gran Colombia Gold (2017b).----- | 13 |
| Figura 8. Ábaco para hallar la resistencia a la compresión uniaxial a partir del Martillo de Schmidt. Tomado de: Fine (Civil Engineering Software), Parámetros de Barton-Bandis, s. f. Recuperado de http://bit.ly/2Ech8Ng ----- | 15 |
| Figura 9. RQD a partir de testigos de perforación. Tomado de Z. T. Bieniawski, Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, And Petroleum Engineering, Canadá: John Wiley & Sons, 1989, p. 38. ----- | 16 |
| Figura 10. Vista en perspectiva de una cuña directa y cuña inversa. Fuente: P. Ramírez y L. Alejano, Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2004. ----- | 26 |
| Figura 11. Cuña descendente y cuña deslizante. Fuente: E. Hoek (2000). Structurally controlled instability in tunnels. En Rock Engineering. Course notes, p. 73. ----- | 27 |
| Figura 12. Mapa de estaciones. Fuente: Elaboración propia por medio del software AutoCAD.----- | 29 |
| Figura 13. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-02. Fuente: Elaboración propia a partir del software Dips.----- | 38 |
| Figura 14. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-05.----- | 39 |
| Figura 15. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-09.----- | 40 |
| Figura 16. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos para roca encajante. ----- | 41 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 17. Histograma del parámetro alteración. Fuente: Elaboración propia. ----- | 42 |
| Figura 18. Histograma del Parámetro de persistencia. Fuente: Elaboración propia. ----- | 43 |
| Figura 19. Histograma del parámetro abertura. Fuente: Elaboración propia. ----- | 43 |
| Figura 20. Histograma del parámetro rugosidad. Fuente: Elaboración propia. ----- | 44 |
| Figura 21. Histograma del parámetro relleno. Fuente: Elaboración propia. ----- | 45 |
| Figura 22. Histograma del parámetro comportamiento del agua. Fuente: Elaboración propia. -- | 46 |
| Figura 23. Fotografía tomada en la veta Santa Inés, en la cual se señala la zona de veta, el cuerpo de veta y el respaldo o roca encajante. ----- | 46 |
| Figura 24. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-01. | 47 |
| Figura 25. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-03. ---- | 48 |
| Figura 26. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-04. ---- | 48 |
| Figura 27. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-06. ---- | 49 |
| Figura 28. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-07. ---- | 50 |
| Figura 29. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-08. ---- | 50 |
| Figura 30. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-10. ---- | 51 |
| Figura 31. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos para la zona mineralizada. | 52 |
| Figura 32. Histograma del parámetro alteración. Fuente: Elaboración propia. ----- | 53 |
| Figura 33. Histograma del parámetro persistencia. Fuente: Elaboración propia. ----- | 54 |
| Figura 34. Histograma del parámetro abertura. Fuente: Elaboración propia. ----- | 55 |
| Figura 35. Histograma del parámetro rugosidad. Fuente: Elaboración propia. ----- | 55 |
| Figura 36. Histograma del parámetro relleno. Fuente: Elaboración propia. ----- | 56 |
| Figura 37. Histograma del parámetro comportamiento del agua. Fuente: Elaboración propia. -- | 56 |
| Figura 38. Ábaco calidad del macizo rocoso y soporte de roca. Fuente: NGI (2015, p. 34).----- | 59 |
| Figura 39. Fuente: NGI (2015, p. 34).----- | 60 |
| Figura 40. Mapeo geomecánico del sistema de clasificación RMR. Fuente: Elaboración propia por medio del software AutoCAD. ----- | 60 |
| Figura 41. Mapeo geomecánico de la clasificación Q. Fuente: Elaboración propia por medio del software AutoCAD. ----- | 64 |
| Figura 42. Fotografía veta Invasores Este.----- | 74 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 43. (a)Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 32/065. (b) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 75 |
| Figura 44.Fotografía veta Invasores Norte. ----- | 76 |
| Figura 45. (a)Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 07/200. (b) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 77 |
| Figura 46. Fotografía tomada al este y al oeste de la sobreguía veta Ovejo. ----- | 79 |
| Figura 47. (a)Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (b) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 79 |
| Figura 48. (d)Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (e) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.----- | 80 |
| Figura 49. (g)Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (h) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.----- | 81 |
| Figura 50.(j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2,3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.----- | 82 |
| Figura 51.(a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2,3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 83 |
| Figura 52.d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2,3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.----- | 84 |
| Figura 53.(g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.----- | 85 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 54. (j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.----- | 86 |
| Figura 55. Fotografía veta 2511. ----- | 87 |
| Figura 56.(a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 4 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 88 |
| Figura 57.(d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.----- | 89 |
| Figura 58. (g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.----- | 90 |
| Figura 59.(j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 3, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.----- | 90 |
| Figura 60.(a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 92 |
| Figura 61.(d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.----- | 93 |
| Figura 62.(g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.----- | 94 |
| Figura 63. Fotografía veta Dolores.----- | 95 |
| Figura 64.(a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 3, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 96 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 65.(d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.----- | 97 |
| Figura 66.(g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.----- | 98 |
| Figura 67.(j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.----- | 99 |
| Figura 68.(m) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (n) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (o) Estabilización de cuñas.----- | 100 |
| Figura 69.(p) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (q) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (r) Estabilización de cuñas.----- | 101 |
| Figura 70.(s) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (t) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (u) Estabilización de cuñas.----- | 102 |
| Figura 71.(v) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 5 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (w) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (x) Estabilización de cuñas.----- | 102 |
| Figura 72.(y) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 4 en el trazado del túnel con dirección 05/095. (z) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (aa) Estabilización de cuñas.----- | 103 |
| Figura 73.(ab) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 5 en el trazado del túnel con dirección 05/095. (ac) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (ad) Estabilización de cuñas.----- | 104 |
| Figura 74. Fotografía veta Invasores Oeste. ----- | 105 |
| Figura 75.(a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 106 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 76.(d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.----- | 107 |
| Figura 77.(g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.----- | 108 |
| Figura 78.(j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.----- | 109 |
| Figura 79. Fotografía de la guía paralela a veta Santa Inés.----- | 110 |
| Figura 80.(a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.----- | 111 |
| Figura 81.(d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.----- | 112 |
| Figura 82.(g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.----- | 113 |
| Figura 83.(j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.----- | 114 |
| Figura 84.(m) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (n) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (ñ) Estabilización de cuñas.----- | 115 |
| Figura 85.(o) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (p) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (q) Estabilización de cuñas.----- | 116 |
| Figura 86. (r) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (s) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (t) Estabilización de cuñas.----- | 117 |

Figura 87. (u) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 4 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (v) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (w) Estabilización de cuñas.----- 118

Figura 88. (x) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 3, 4 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (y) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (z) Estabilización de cuñas.----- 119

Índice de tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Parámetros de clasificación y sus respectivos puntajes. | 18 |
| Tabla 2. Ajuste de puntaje para la orientación de las discontinuidades. | 19 |
| Tabla 3. Clases de macizos rocosos determinadas a partir de la puntuación total. | 19 |
| Tabla 4. Valores – RQD | 20 |
| Tabla 5. Valores - Jn | 21 |
| Tabla 6. Valores Jr | 22 |
| Tabla 7. Valores – Ja | 23 |
| Tabla 8. Valores – Jw | 24 |
| Tabla 9. Valores - SRF | 25 |
| Tabla 10. RCU Veta Invasores Este (CB - 01) | 31 |
| Tabla 11. RCU Cruzada Invasores Oeste (CB - 02) | 32 |
| Tabla 12. RCU Veta Invasores Norte (CB - 03) | 33 |
| Tabla 13. RCU veta Los Mellizos (CB - 04) | 33 |
| Tabla 14. RCU paralela a veta Santa Inés (CB - 05) | 34 |
| Tabla 15. RCU sobreguía veta Ovejo (CB - 06) | 35 |
| Tabla 16. RCU respaldo veta 2511 (CB - 07) | 35 |
| Tabla 17. RCU veta 2511 (CB - 08) | 36 |
| Tabla 18. RCU sobreguía veta Ovejo (CB - 09) | 36 |
| Tabla 19. RCU respaldo veta Dolores (CB - 10) | 37 |
| Tabla 20. Familias principales (1m,2m,3m,4m) y familia secundaria (5m) | 41 |
| Tabla 21. Familias principales y secundarias de diaclasas. | 52 |
| Tabla 22. Directrices para el uso de soporte de acuerdo con el sistema RMR. | 58 |
| Tabla 23. Valor ESR. | 59 |
| Tabla 24. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 02 | 61 |
| Tabla 25. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 05 | 62 |
| Tabla 26. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 09 | 63 |
| Tabla 27. Clasificación por el método Q (estación CB-02) | 65 |
| Tabla 28. Clasificación por el método Q (estación CB-05) | 65 |
| Tabla 29. Clasificación por el método Q (estación CB-09) | 66 |
| Tabla 30. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 01 | 66 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 31. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 03 | 67 |
| Tabla 32. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 04 | 67 |
| Tabla 33. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 06 | 68 |
| Tabla 34. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 07 | 68 |
| Tabla 35. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 08 | 69 |
| Tabla 36. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 10 | 70 |
| Tabla 37. Clasificación por el método Q (estación CB – 01) | 70 |
| Tabla 38. Clasificación por el método Q (estación CB-03) | 71 |
| Tabla 39. Clasificación por el método Q (estación CB-04) | 71 |
| Tabla 40. Clasificación por el método Q (estación CB-06) | 72 |
| Tabla 41. Clasificación por el método Q (estación CB-07) | 72 |
| Tabla 42. Clasificación por el método Q (estación CB-08) | 73 |
| Tabla 43. Clasificación por el método Q (estación CB-10) | 73 |
| Tabla 44. Combinación de familias 1, 2 y 3 corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 75 |
| Tabla 45. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias 1, 2 y 3. | 75 |
| Tabla 46. Combinación de familias 1,2 y 3 correspondientes al siguiente conjunto de familias estructurales: | 77 |
| Tabla 47. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3 | 77 |
| Tabla 48. Combinación de familias 1, 2, 3 y 4 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 79 |
| Tabla 49. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3. | 79 |
| Tabla 50. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4 | 80 |
| Tabla 51. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4. | 81 |
| Tabla 52. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4. | 82 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 53. Combinación de familias 1,2,3 y 4 del este de esta sobre guía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 82 |
| Tabla 54. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4. | 83 |
| Tabla 55. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,3 y 4. | 84 |
| Tabla 56. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,2 y 4. | 85 |
| Tabla 57. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,2 y 3. | 86 |
| Tabla 58. Combinación de familias 1,2,3,4 y 5 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 87 |
| Tabla 59. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4. | 88 |
| Tabla 60. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 4 y 5. | 89 |
| Tabla 61. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 4 y 5. | 90 |
| Tabla 62. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 3, 4 y 5. | 91 |
| Tabla 63. Combinación de familias 1, 2, 3 y 4 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 91 |
| Tabla 64. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3. | 92 |
| Tabla 65. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4. | 93 |
| Tabla 66. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4 | 94 |
| Tabla 67. Combinación de familias 1, 2, 3, 4 y 5 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 96 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 68. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias de diaclasas 3, 4 y 5. | 96 |
| Tabla 69. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3. | 97 |
| Tabla 70. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4. | 98 |
| Tabla 71. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 5. | 99 |
| Tabla 72. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 4 y 5. | 100 |
| Tabla 73. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4. | 101 |
| Tabla 74. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2,4 y 5. | 102 |
| Tabla 75. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 5. | 102 |
| Tabla 76. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,2 y 4. | 103 |
| Tabla 77. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 5. | 104 |
| Tabla 78. Combinación de familias 1,2,3 y 4 corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 105 |
| Tabla 79. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3. | 106 |
| Tabla 80. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4. | 107 |
| Tabla 81. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4. | 108 |
| Tabla 82. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4. | 109 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Tabla 83. Combinación de familias 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales: | 111 |
| Tabla 84. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3. | 112 |
| Tabla 85. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4. | 113 |
| Tabla 86. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 5. | 114 |
| Tabla 87. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3. | 115 |
| Tabla 88. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 5. | 116 |
| Tabla 89. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4. | 117 |
| Tabla 90. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 5. | 118 |
| Tabla 91. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 4 y 5. | 119 |
| Tabla 92. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 3, 4 y 5. | 120 |
| Tabla 93. Resumen de la calidad del macizo rocoso y su respectivo sostenimiento según el sistema RMR y Q para zonas mineralizadas. | ¡Error! Marcador no definido. |
| Tabla 94. Resumen de la calidad del macizo rocoso y su respectivo sostenimiento según el sistema RMR y Q para roca encajante. | 122 |

1. Introducción

En Colombia la industria minera tiene el potencial de perfilarse como una de las principales fuentes motoras de la economía, siendo esto de gran importancia para el desarrollo del país y el abastecimiento de materias primas para la mayoría de los sectores económicos.

Por tradición, gran parte de las minas subterráneas en nuestro país trabajan de forma artesanal o apoyada en la experiencia de los procesos de excavación y soporte, sin responder a técnicas ingenieriles de la geología y la geotecnia, lo cual, si bien funciona en ambientes de características geológica muy favorables o conlleva a ahorros temporales, puede traer pérdidas en vidas humanas e ineficiencia en los desarrollos a largo plazo. Los procesos de producción minera modernos están íntimamente ligados al conocimiento geológico y geotécnico de los macizos rocosos como herramientas orientadas a la mayor productividad y seguridad en el trabajo. Se deben conocer las propiedades y el comportamiento mecánico de las rocas, y su respuesta a los esfuerzos a los que son sometidas, con el fin de diseñar las medidas de seguridad adecuadas en una excavación.

En este proyecto se presenta una caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel 21 de la mina La Maruja (distrito minero de Marmato, Caldas, Colombia) y un análisis de cuñas con el fin de estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte; asimismo, se realiza una evaluación del efecto de las alteraciones hidrotermales para correlacionar los resultados obtenidos de la clasificación geomecánica realizada en roca sana con las obtenidas en los sectores con presencia de alteración hidrotermal.

Para la realización del presente trabajo se empleó una metodología de investigación de fuentes secundarias como información proporcionada por la corporación Gran Colombia Gold, correspondiente a la zona de estudio. Ahora bien, después de esta información, se acude a referencias encontradas en diversas bases de datos bibliográficas de la Universidad EAFIT. Seguido a esto se hace una fase de campo y finalmente un procesamiento de datos y un trabajo analítico para el desarrollo de la discusión.



Figura 1. Sección transversal del yacimiento de oro de Marmato con aspecto NW que muestra las intrusiones P1 a P5. Fuente: Gran Colombia Gold (2017).

1.1. Pregunta problema.

¿Existe alguna relación entre la calidad del macizo rocoso y las alteraciones hidrotermales y se ve reflejado mediante los métodos de clasificación geomecánica RMR y Q?

¿Qué tanto pueden diferir las recomendaciones de sostenimiento en el macizo encajante con respecto de las alteraciones hidrotermales en las vetas principales?

1.2. Hipótesis.

La clasificación del macizo rocoso y su sectorización oportuna disminuye el riesgo laboral, los costos derivados del soporte empleado y mejora la eficiencia del trabajo en las excavaciones.

1.3. Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Caracterizar y clasificar geomecánicamente el macizo rocoso del nivel veintiuno de la mina subterránea La Maruja, usando los sistemas de clasificación RMR y Q para sectorizar el nivel y estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte que propendan por la estabilidad de la excavación y labores mineras. Además, analizar el efecto de las alteraciones hidrotermales en la calidad del macizo rocoso.

1.3.2 Objetivos específicos.

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

1.4 Metodología.

Para el desarrollo del presente trabajo se llevaron a cabo tres fases, a continuación, se sintetizan las estrategias y procedimientos ejecutados para lograr los objetivos de la investigación.

Las fases realizadas son las siguientes:

1.4.1 Recopilación de información y planeación del trabajo de campo.

Se hizo una revisión bibliográfica de la información aportada por la empresa Gran Colombia Gold Marmato acerca del tipo de depósito y sus características geológicas, sistemas de explotación empleados, características de la roca y parámetros del macizo rocoso, además del apoyo académico de estudios previos relacionados con la temática del proyecto objeto de estudio, base teórica de la mecánica de rocas y las metodologías más utilizadas en la clasificación de macizos rocosos.

Por otro lado, se adaptaron los mapas existentes del nivel 21 de la mina La Maruja a una escala 1:1000 y se llevaron a cabo los preparativos necesarios para el buen desarrollo del levantamiento

de las discontinuidades en la fase de campo como la selección e impresión de los formatos para el mapeo geomecánico. Asimismo, se hizo una revisión de la información de las planchas y memorias del Servicio Geológico Colombiano.

1.4.2 Fase de campo.

La campaña de campo tuvo una duración de siete días en el municipio de Marmato, Caldas, la cual enfatizó en diez estaciones con una longitud total de 58,88 metros mapeados, donde se efectuó el levantamiento estructural y de las discontinuidades teniendo en cuenta los parámetros propuestos por Bieniawski (1989) –RQD, espaciamiento de la discontinuidad, condición de las discontinuidades, orientación de las discontinuidades y presencia de agua– y los de Barton et al. (1974) –RQD, Jn, Jr, Ja, Jw y SRF– insumos necesarios para la posterior clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel 21 de la mina La Maruja.

Por otra parte, se hizo una toma de datos sistemática del rebote por medio del Martillo de Schmidt (esclerómetro), teniendo en cuenta diez lecturas por diaclasa con el fin de estimar la resistencia a la compresión uniaxial (RCU). El número de datos tomados para el rebote promedio fue de 200 valores.

1.4.3 Fase posterior al trabajo de campo.

Esta fase comprende, inicialmente, el compendio del marco teórico, seguido del procesamiento de los datos tomados en la fase de campo para su posterior análisis y finalmente la recopilación de los resultados para la construcción de la discusión.

Después de procesar los datos tomados con el martillo de Schmidt se halló la resistencia a la compresión uniaxial para cada una de las estaciones. Seguidamente, se realizó la caracterización de las discontinuidades donde se desarrolló de forma desligada el análisis para roca encajante y zonas mineralizadas; este análisis comprende la interpretación de las tendencias estructurales arrojadas por el software DIPS y para cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

Adicionalmente, se procedió a la clasificación geomecánica a través de las metodologías RMR de Bieniawski (1989) y Q de Barton et al. (1974), mostrando las variaciones en cada una de estas clasificaciones. También se elaboró el mapa geomecánico referente a cada clasificación.

Por último, se llevó a cabo el análisis cinemático de cuñas por medio del software Unwedge de la casa Rockscience en su versión 3.005, lo cual permitió dar las recomendaciones de uso de soporte.

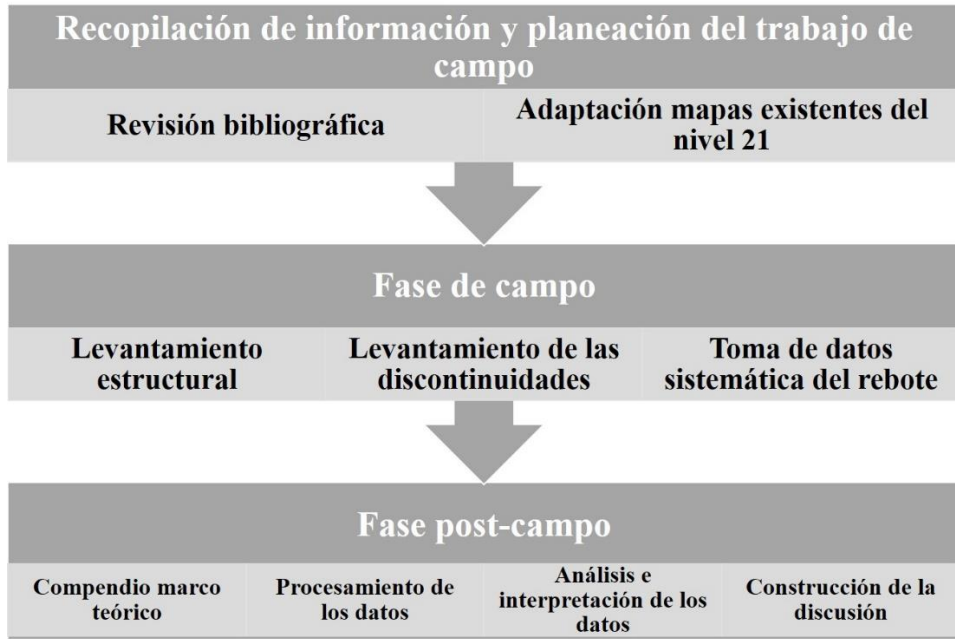


Figura 2. Metodología para el desarrollo del trabajo de grado. Fuente: Elaboración propia.

2. Marco teórico

2.1 Localización.

El distrito minero de oro y plata de Marmato está ubicado en la Cordillera occidental de los Andes de Colombia, en el departamento de Caldas, a 86 km de su capital, Manizales, y a 80 km de la ciudad de Medellín. Desde ambas ciudades hay acceso vía terrestre por carreteras pavimentadas.

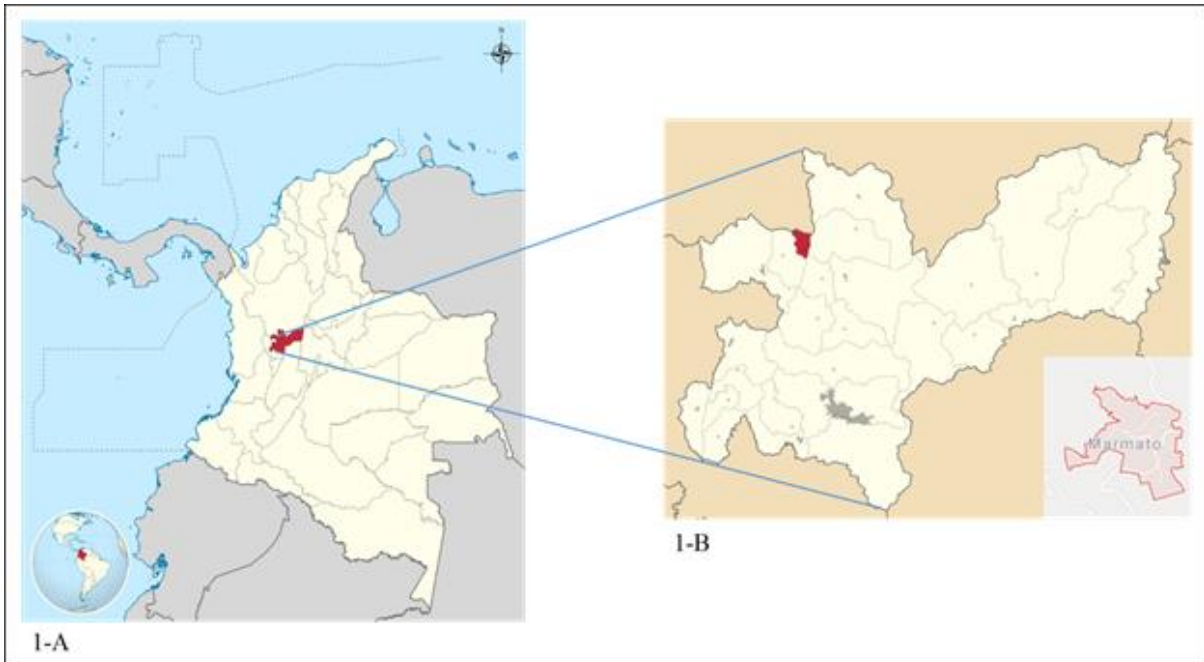


Figura 3. 1-A Ubicación del departamento de Caldas en Colombia. 1-B Ubicación del municipio de Marmato en Caldas. Fuente: elaboración propia a partir de Wikipedia Commons (2012). Caldas. Recuperado de <https://bit.ly/1L8nrhN>

2.2 Geología regional.

La zona de estudio se localiza al oeste del río Cauca sobre la cordillera occidental donde afloran rocas ígneas intrusivas, formaciones sedimentarias y rocas metamórficas. Las edades de las unidades varían desde el Paleozoico hasta el Mioceno, siendo las más antiguas las rocas metamórficas del grupo Arquía. Este cuerpo fue estudiado en un principio por Restrepo y Toussaint (1975) quienes lo diferenciaron del Grupo Ayurá-Montebello por su mineralogía.

Por otra parte, “las rocas más recientes que corresponden al Mioceno son el stock de Marmato, datada por K/Ar arrojando edades de $6.3 \pm 0,7$ Ma y el pórfido andesítico hornbléndico de la carretera La Felisa-Irra, analizada por el método K/Ar con edades: $6,8 \pm 0,2$ Ma en biotita y $7,1 \pm 0,2$ M.a. en hornblenda” (González, 1976).

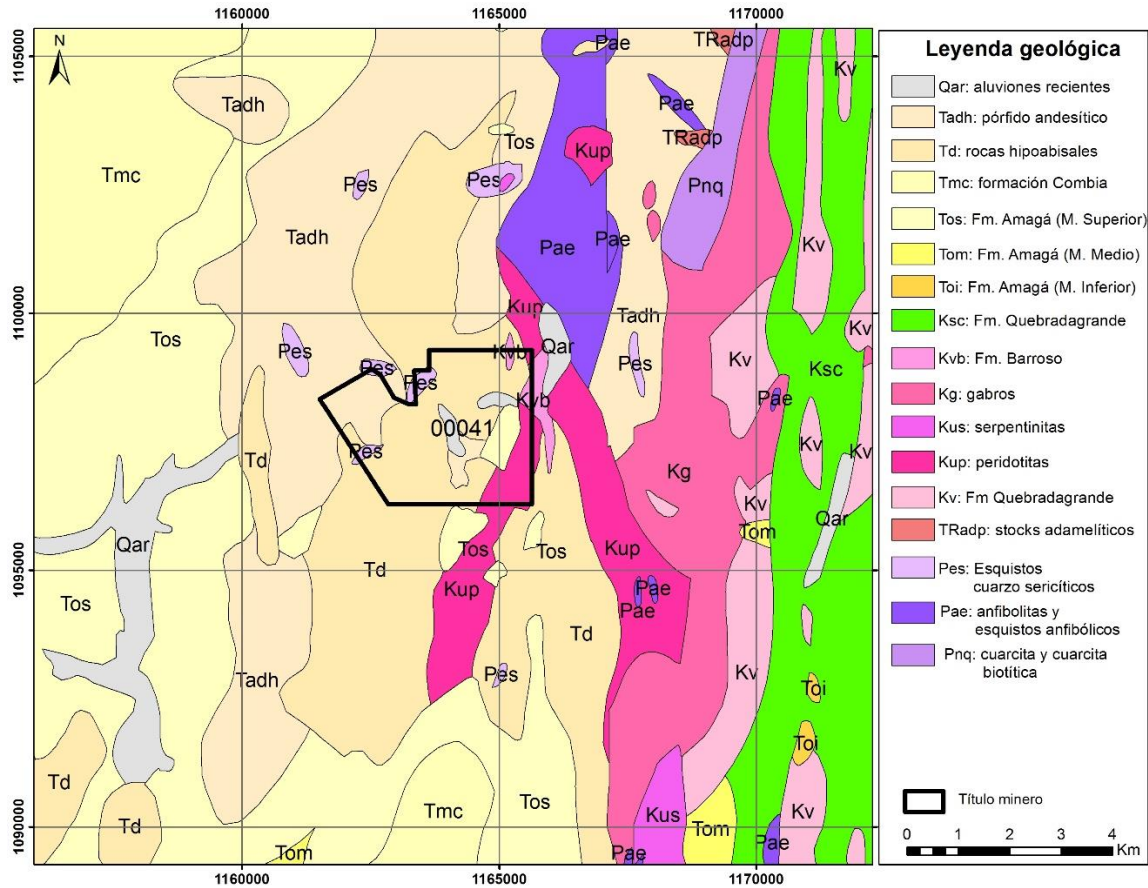


Figura 4. Geología regional. Tomado y modificado de la Plancha 186 Riosucio y Plancha 187 Salamina [versión digital]. Servicio Geológico Colombiano, 2009

2.2.1 Litología.

2.2.1.1 Rocas metamórficas.

Según Restrepo y Toussaint (1975), estas rocas corresponden a un origen tectónico distinto al de las rocas metamórficas de la cordillera Central. Por su parte, Álvarez (1979) “sugiere que la edad Cretácea obtenida mediante datación radiométrica de una muestra de anfibolita de esta unidad solo manifiesta los efectos térmicos sufridos por las unidades metamórficas en períodos post-paleozoicos” (citado en Calle y González, 1982, p. 25).

Estas rocas “son en su mayoría son el producto de metamorfismo térmico de presión baja, facies esquistos verde” (Calle y González, 1982). Además, existe una aureola que generó metamorfismo de contacto producto de las intrusiones ígneas de pórfidos andesíticos del Neógeno y el Batolito de Farallones. Esta roca está caracterizada por la presencia de silicatos de aluminio sericitizados y

por la ocurrencia de biotita incipiente en rocas arenosas de la Formación Amagá. Por último, se encuentra metamorfismo cataclástico de milonitas y cataclasitas cerca a la Falla Mistrató (Calle y González, 1982).

2.2.1.2 Rocas ígneas.

Están representadas en orden cronológico por rocas volcánicas de corteza oceánica y cubiertas parcialmente por secuencias volcánicas características de arcos volcánicos y secuencias sedimentarias. Las rocas volcánicas de ambiente marino que afloran a los costados del Río Cauca fueron denominadas Formación Barroso; y “en el área existen rocas ultramáficas como gabros que podrían ser complejos ofiolíticos emplazados por el sistema de Fallas Romeral” (Calle y González, 1982, p. 52).

Posteriormente, el sistema andino presenta una serie de cuerpos ígneos que instruyen la corteza en el Jurásico-Cretácico, como “el stock de Támesis [y] el Plutón de Mistrató” (Calle y González, 1982, p. 52) que representan esos primeros pulsos magmáticos. Ya para el Neógeno, el vulcanismo se desplaza a la cordillera Occidental principalmente donde comienza la intrusión del batolito de Mandé de edad Oligoceno y, por último, el emplazamiento del Batolito de Farallones y pórfidos andesíticos y dacíticos que corresponden al Mioceno y que, según Álvarez (1979), “indican que estos [cuerpos] reaccionaron con el magma residual durante las últimas etapas del emplazamiento, siendo parcialmente disueltos por él” (citado en Calle y González, 1982, p. 78).

2.2.1.3 Rocas sedimentarias.

Las unidades sedimentarias afloran geocronológicamente desde el Cretácico, estudiadas por Álvarez y González en 1978; el Miembro Urrao es el área que aflora correspondiente a la Formación Penderisco que corresponde “a una secuencia sedimentaria de ambiente marino” con estratificaciones gradacionales conformada por sedimentos terrígenos y pelágicos (Calle y González, 1982, p. 14).

Adicionalmente, según Sierra (1994), la evolución tectónica de la cordillera generó una cuenca en la cual se depositaron sedimentos del terciario en un ambiente fluvio-lacustre denominada Formación Amagá, la cual también contiene mantos de carbón con interés económico. A finales del Neógeno el intenso vulcanismo con flujos de lava, intrusivos porfiríticos y eyección de rocas

piroclásticas se depositan sobre las rocas cretáceas y neógenas. “Este grupo de rocas volcánicas y sedimentarias fueron denominadas Formación Combia [por Grosse en 1926]” (Calle y González, 1982, p. 32).

2.2.2 Geología estructural.

Las unidades geológicas que afloran en la *Plancha 186 Riosucio* evidencian varias fases de deformación, producto del movimiento de las placas tectónicas Suramericana, Nazca y Caribe caracterizado por la formación de la cadena montañosa de los Andes, los cuales muestran tipos de deformación como plegamiento, levantamientos diferenciales y eventos magmáticos del Cretácico y Neógeno.

Dichas deformaciones dificultan reconocer y separar un evento con otro, además, representa un obstáculo para la comprensión de las relaciones estratigráficas y estructurales de la zona (Estrada, González y Viana, 2001).

Debido a la ausencia de los nombres de las fallas geológicas en la *Plancha 186 Riosucio*, nos remitimos a la plancha subyacente (*Plancha 205 Chinchiná*) de la cual explican Estrada et al. (2001) que:

La superposición de fases de deformación es el resultado de la interacción de un sistema complejo de fallamiento donde predominan tres direcciones: N-S, N 20-30o E y N50-60o E. Los movimientos a lo largo de estas fallas han interactuado para acomodar la deformación sufrida. Aunque la cartografía indicada en el mapa muestra unidades homogéneas, internamente están afectadas por fallas menores que modifican las características estructurales de cada una de ellas. Las fallas subparalelas con dirección N-S a NE-SW pertenecen, en conjunto, a los sistemas de fallas de Cauca y Romeral (2001, p. 32).

El mayor rasgo estructural en el área cartografiada de la zona de falla Romeral afecta rocas de distinta naturaleza y edad, unidades de roca desde el Paleozoico hasta el Cenozoico medio. Este sistema de fallas “tiene una dirección predominante norte-sur que está compuesta por tres fallas paralelas a subparalelas que se entrecruzan entre sí” (Servicio Geológico Colombiano, 2013, p. 32).

Además de las fallas de los sistemas Cauca y Romeral, hay estructuras con dirección NW-SE posteriores al sistema de fallas del Cauca, pues desplazan fallas de este sistema con un movimiento aparente lateral izquierdo. Fallas con desplazamiento de unos pocos centímetros y trazas no cartografiadas a escala regional, afectan también las rocas terciarias. Evidencias de fallamiento del Pleistoceno son escasas; existe, asociado con las trazas del sistema de fallas Romeral, un basculamiento de depósitos de textura gruesa y origen volcánico en los valles de los ríos Chinchiná y Claro (Estrada et al., 2001).

2.3 Geología local del yacimiento.

Este yacimiento de oro y plata se encuentra localizado al oeste de Marmato, está hospedado por el Stock de Marmato de pórfido andesítico a dacítico, y consta de dieciocho kilómetros de largo y entre tres y seis kilómetros de ancho y alargado de norte a sur. Intruye al Complejo Arquía y a la Formación Amagá en el lado este del Valle del Cauca, y la Formación Combia en el lado oeste, y se caracteriza por presentar una mineralización de estilo epitermal y mesotermal de baja e intermedia sulfuración (Gran Colombia Gold Corp., 2017b).

Sus principales afloramientos están localizados al oeste del corregimiento de Marmato y en las quebradas El Salado, Los Indios y Chaburquia. Se caracteriza por presentar cloritización de los ferromagnesianos, seritización de los feldespatos y por albergar filones mineralizados que son los que constituyen Minas Nacionales de Marmato (González y Calle, 1982).

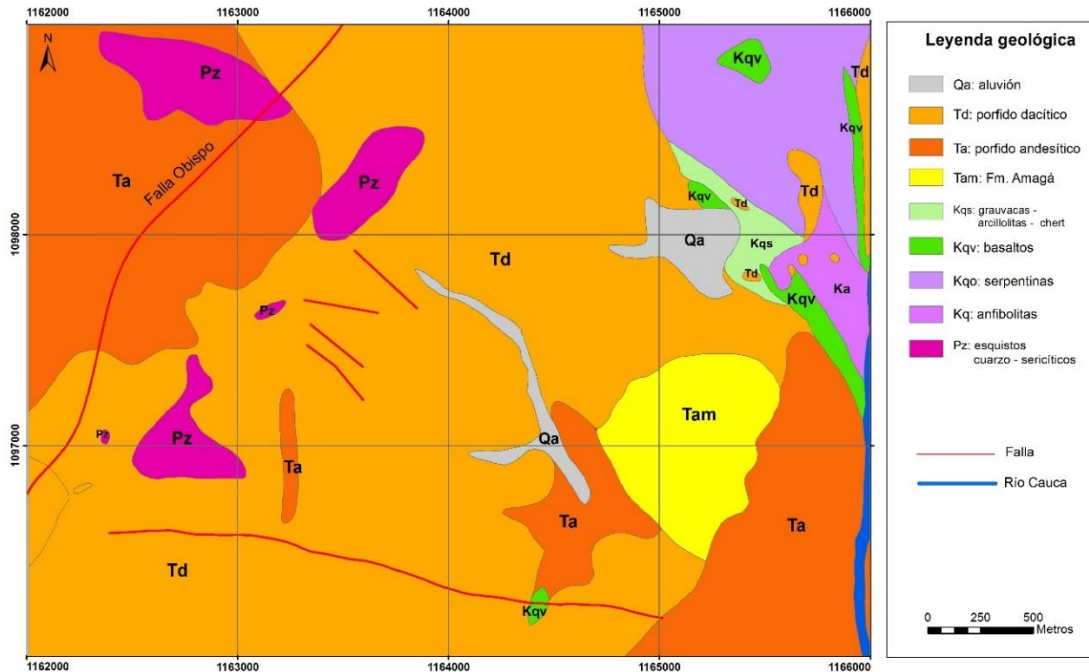


Figura 5. Geología local. Tomada y modificada del mapa aportado por Gran Colombia Gold (2017b).

De acuerdo con Ceballos (s.f.):

El depósito de oro de Marmato está clasificado como un depósito de tipo Stockwork, compuesto principalmente por dacita y andesita, como un cuerpo alargado de 18 km de largo con tendencia N-S y un ancho de entre 3 km a 6 km con tendencia E-W. Dicho cuerpo fue hospedado en un fracturamiento dilatante de tipo tensional con tendencia E-W representado por vetillas de dos metros de longitud y escasos centímetros de ancho, con valores de Au mayores a 3g/t. Esta zona tiene unos 60 m de espesor y 500 m de longitud, la cual representa el primer evento mineralizante del depósito de tipo mesotermal asociado a la acreción del bloque Chocó en dirección NW-SE desarrollando un sistema de fracturas transcurrentes sinistral de tipo “R” y dextrales de tipo “R’” que cortan las fracturas tensionales, provocando rotación por los esfuerzos compresivos de E-W a NW-SE. Dichos esfuerzos seguirán actuando de forma intermitente generando deformación y cambios direccionales en las fracturas **R** que rotan de N30W a N60W, y las **R’** de N70W a S10W. El avance de las fuerzas deformacionales favorece la interconexión de las fracturas R y R’ y el ascenso de los fluidos mineralizantes de tipo epitermal de baja sulfuración, los cuales forman vetas de hasta 600 m de longitud. Finalizando este evento el campo de esfuerzos compresivos cambia y rota a WNW-ESE, generando movimientos de tipo dextral y distensión en las fracturas E-W, donde ingresa preferentemente el tercer evento mineralizante de tipo epitermal de sulfuración intermedia (Ceballos, s. f., p. 1).

En síntesis, la subducción de corteza oceánica en un límite convergente (que en la actualidad se cree que fue el cañón del río Cauca), donde se encuentra el sistema de Fallas Romeral, separa

la cordillera Central de la Occidental y es un proceso continuo que genera vulcanismo y emplazamiento de esas secuencias ofiolíticas. No obstante, los esfuerzos no son compresivos a lo largo de toda la cordillera por lo que se cree que este depósito, en un inicio, se hospeda en esfuerzos tensionales con tendencia E-W para el Mioceno, el cual posteriormente con la acreción del bloque Chocó genera nuevos esfuerzos de tipo transcurrente sinistral que provocan la rotación de dicho cuerpo.

2.3.1 Características geológicas del depósito.

La mineralización en Marmato ocurre en tres niveles topográficos diferentes: la zona Echandía cercana a la superficie (1450 a 1600 m.s.n.m) que corresponde a la parte superior del pórfido, la zona intermedia (1300 a 1450 m.s.n.m) y la zona baja (1160 a 1260 m.s.n.m). Los minerales de ganga en todas estas zonas son carbonatos (principalmente calcita) y cuarzo (Gaeta, Díaz y Buenaventura, 2008). Cabe resaltar que la mina La Maruja se encuentra en la zona baja.

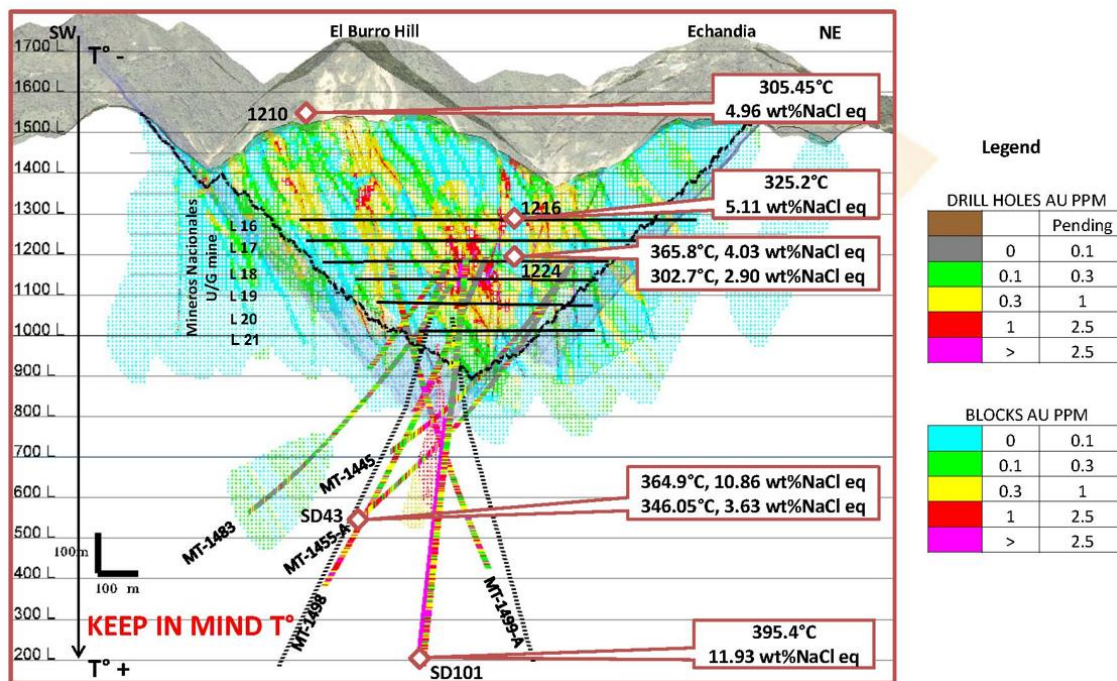


Figura 6. Esquema depósito de Marmato. Fuente: Gran Colombia Gold (2017a, p. 29).

Tal como expresa Gran Colombia Gold en su reporte técnico:

La mineralización en este yacimiento de oro se caracteriza por dos fases distintas, una primera fase caracterizada por un estilo epitermal de baja sulfuración, el cual es superpuesto por una fase epitermal de sulfuración intermedia, dicha mineralización ocurre en vetas

paralelas, laminadas y anastomosadas, todas las cuales siguen un control estructural regional. Basados en el tipo de roca encajante, en las características de los filones, en los orígenes de las fracturas, en las estructuras que forman los minerales estériles, en el tipo de alteración predominante (propilítica) y la zonación vertical observada en los filones, fue que concluyeron que era de tipo epitermal (Botero y Zuluaga, 1980). Además, este depósito comprende principalmente venillas y vetas ricas en sulfuros, compuestas por cuarzo, carbonato, pirita, arsenopirita, esfalerita rica en Fe (marmatita), pirrotina, calcopirita y oro electrum en la zona superior epitermal, por otro lado, cuarzo, pirrotina, calcopirita, sulfuro de bismuto y minerales de telururo y oro libre en la zona inferior mesotermal. La alteración propilítica temprana generalizada se sobreimprime principalmente por alteración argílica-intermedia relacionada con las vetas mineralizadas de oro de tipo epitermal de baja a intermedia sulfuración. El pórfido de Marmato se caracteriza por cinco pulsos principales denominados de P1 a P5, organizado en orden cronológico del más antiguo al más joven (Gran Colombia Gold, 2017b). Ver Figura 6.

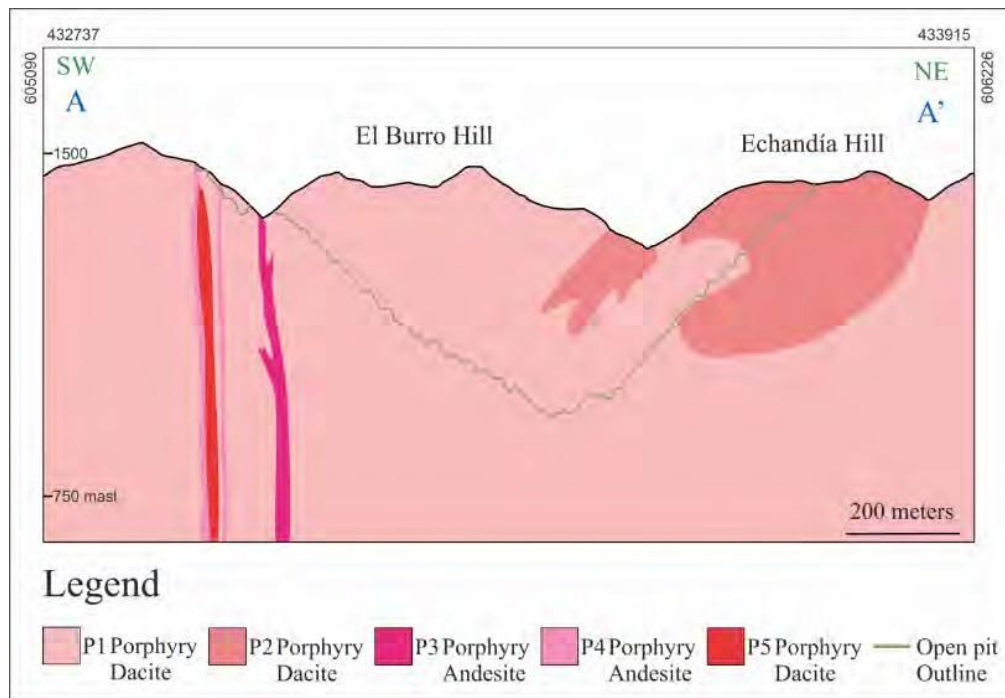


Figura 7. Sección transversal del yacimiento de oro de Marmato con aspecto NW que muestra las intrusiones P1 a P5. Fuente: Gran Colombia Gold (2017b).

2.4 Sistemas de clasificación geomecánica de macizos rocosos.

Numerosos sistemas de clasificación de macizos rocosos existen hoy en día; sin embargo, seis de ellos deben ser mencionados, ya que son contribuciones importantes en el tema, siendo estos los propuestos por Terzaghi (1946), Lauffer (1988), Deere (1988), Wickham et al. (1972), Bieniawski (1979) y Barton, Lien y Lunde (1974). Actualmente, el sistema RMR y el sistema Q

son las dos clasificaciones de masas rocosas más utilizadas en la ingeniería de rocas en todo el mundo (Bieniawski, 1993), siendo estos dos sistemas la base para el desarrollo de la presente investigación.

Como lo exponen Milne, Hadjigeorgiou & Pakalnis (1998):

Los sistemas de clasificación de macizos rocosos constituyen una parte integral en el diseño empírico de una mina. Se utilizan tradicionalmente para agrupar áreas de características geomecánicas similares, y proporcionan una guía para el rendimiento de estabilidad y la selección del soporte adecuado.¹

2.4.1 Rock Mass Rating (RMR).

Este sistema fue presentado por el profesor Bieniawski en 1973, y actualizado en 1989. Este sistema clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, valorando seis parámetros, a saber: i) la resistencia a la compresión uniaxial; ii) RQD; iii) espaciamiento de las discontinuidades; iv) condición de las discontinuidades (apertura, relleno, meteorización, persistencia y rugosidad); v) orientación de las discontinuidades, y vi) presencia de agua (Celada, Tardáguila, Rodríguez, Varona y Bieniawski, 2014). Enseguida se definen los parámetros mencionados anteriormente.

2.4.1.1 Resistencia a la compresión uniaxial (RCU).

Parámetro que permite caracterizar y clasificar la matriz rocosa. La resistencia determina la competencia de la roca para mantener unido todos sus componentes y depende principalmente de la composición mineralógica de la roca y grado de alteración (Rodríguez, 2007).

Esta se puede obtener por criterios de campo (ISRM, 1978), por ensayos de resistencia en laboratorio, o por correlaciones con el Martillo Schmidt. Para este trabajo se usaron la primera y la última, debido a que no se contó con presupuesto para los ensayos de laboratorio.

2.4.1.1.1 Martillo de Schmidt.

El Martillo de Schmidt o esclerómetro es un instrumento diseñado para realizar ensayos de dureza, siendo éste un método no destructivo [...] Aunque en un principio se creó para

¹ Todas las traducciones de las citas de los textos en inglés son de nuestra autoría.

estimar la resistencia a la compresión simple del concreto, el martillo se ha modificado convenientemente para dar lugar a nuevos modelos, algunos de los cuales resultan apropiados para estimar la compresión simple en roca, ya que por su tamaño y la manejabilidad del aparato puede aplicarse sobre la matriz de la roca y sobre las caras de las discontinuidades. Por medio de éste, se mide la resistencia al rebote de la superficie de la roca, dato utilizado para hallar la resistencia a la compresión uniaxial, correlacionándolo mediante el gráfico de Miller (1965) que contempla la densidad de la muestra y la orientación del martillo respecto al plano ensayado (Lozano, s. f., pp. 1-3).

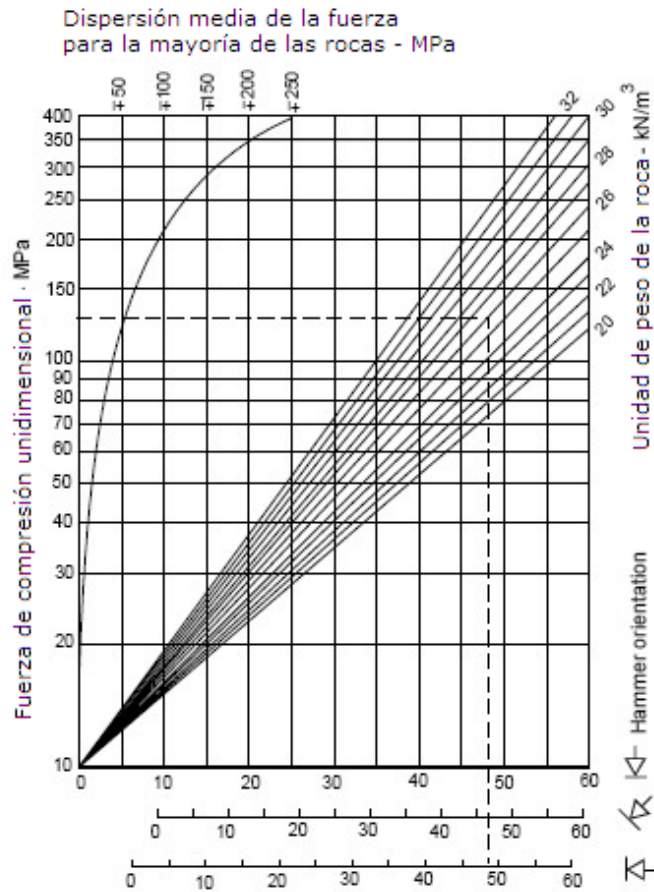


Figura 8. Ábaco para hallar la resistencia a la compresión uniaxial a partir del Martillo de Schmidt. Tomado de: Fine (Civil Engineering Software), Parámetros de Barton-Bandis, s. f. Recuperado de <http://bit.ly/2Ech8Ng>

2.4.1.2 RQD.

El RQD se define como el índice de designación de calidad de la roca; este método fue desarrollado por Deere entre 1963 y 1967 para cuantificar la calidad del macizo rocoso con respecto a núcleos de perforación.

En dichos núcleos debe tomarse una sección de 100 cm donde se medirá el porcentaje de piezas núcleo intacto mayores a 10 cm de longitud, que se suman y se dividen por la longitud total del núcleo. En adición, se debe tener en cuenta que las piezas de núcleo que no estén de forma sólida o tengan longitudes menores a 10 cm no deben contarse; por otro lado, el diámetro del núcleo debe ser preferiblemente de 54,7 mm. Este método puede ser utilizado siempre y cuando la perforación sea lo suficientemente cuidadosa para que no cause fracturas en el núcleo por sí sola (Bieniawski, 1989).

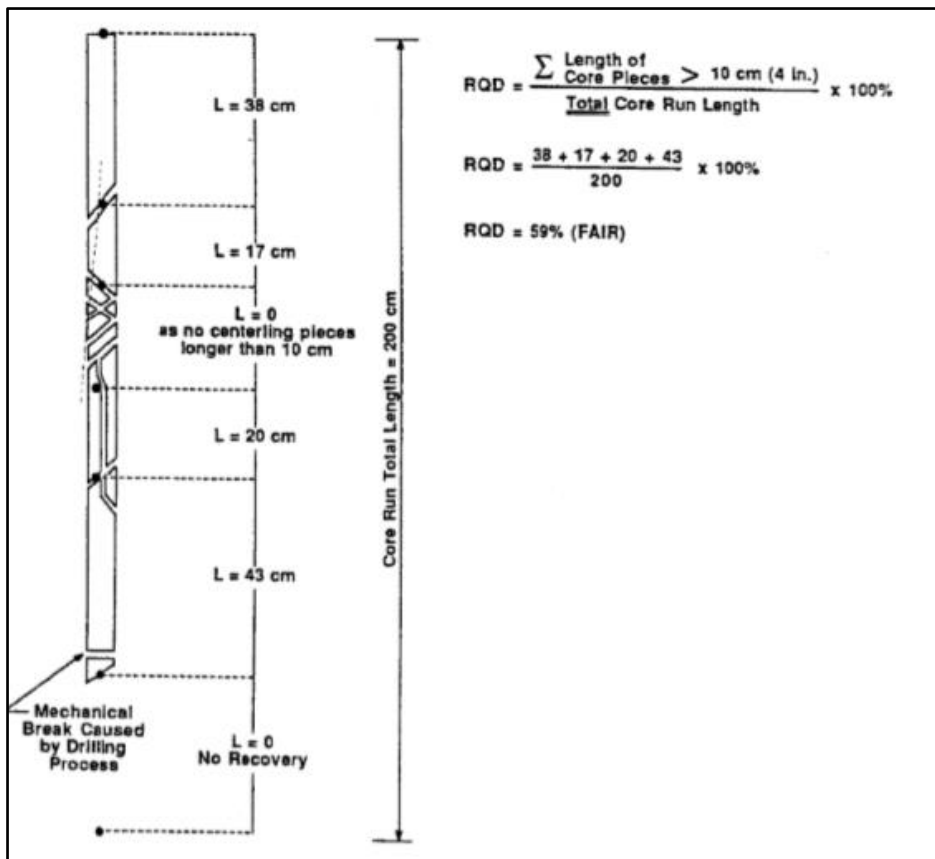


Figura 9. RQD a partir de testigos de perforación. Tomado de Z. T. Bieniawski, *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, And Petroleum Engineering*, Canadá: John Wiley & Sons, 1989, p. 38.

Anteriormente el RQD solo estaba determinado por el resultado del porcentaje de núcleo recuperado y por la apreciación del geólogo de campo, por lo que Palmström (1982) optó por demostrar que el RQD se podía estimar a partir del número de diaclasas por unidad de volumen, que se exponen en los afloramientos, las excavaciones subterráneas, los taludes y las áreas de explotación, entre otros, utilizando la siguiente relación para masas rocosas sin arcilla (Bieniawski, 1989):

$$\text{RQD} = 115 - 3.3J_v$$

Donde J_v es el total de diaclasas por metro cúbico.

2.4.1.3 Espaciamiento de las discontinuidades.

Es la distancia media perpendicular entre planos consecutivos de la misma familia, por lo que el espaciado de las distintas familias define el tamaño de los bloques de matriz rocosa (Rodríguez, 2007).

2.4.1.4 Agua subterránea.

Se refiere a la presencia de agua. Las filtraciones influyen en la resistencia al corte. El agua procede mayoritariamente del flujo en discontinuidades (permeabilidad secundaria); en rocas sedimentarias puede haber también filtración en la matriz rocosa (permeabilidad primaria) (Rodríguez, 2007).

2.4.1.5 Condición de las discontinuidades:

2.4.1.5.1 Persistencia. Longitud o extensión superficial del plano de la discontinuidad, el cual debe medir la longitud de los dos lados del plano: dirección y buzamiento (Rodríguez, 2007).

2.4.1.5.2 Apertura. Distancia perpendicular que separa las paredes rocosas de una discontinuidad. (Rodríguez, 2007).

2.4.1.5.3 Rugosidad. Ondulación de la superficie en la discontinuidad o irregularidades a pequeña escala, la cual tiene gran influencia en el comportamiento geomecánico, sobre todo en la resistencia al corte (Rodríguez, 2007).

2.4.1.5.4 Relleno. Material distinto de la roca que aparece entre las paredes de una discontinuidad. Se deben describir todos los aspectos referentes a su estado y sus propiedades, si sus materiales son blandos o alterados. (Rodríguez, 2007).

2.4.1.5.5 *Alteración*. Estimar el grado de meteorización del macizo rocoso en conjunto y de cada una de las diaclasas. (Rodríguez, 2007).

Para aplicar la clasificación geomecánica, Bieniawski indica lo siguiente:

Este macizo rocoso se divide en varias regiones estructurales de manera que ciertas características son más o menos uniformes dentro de cada región. Aunque las masas rocosas son de naturaleza discontinua, pueden sin embargo ser uniformes en regiones cuando, por ejemplo, el tipo de roca o las distancias de discontinuidad son las mismas en toda la región. En la mayoría de los casos, los límites de las regiones estructurales coincidirán con características geológicas importantes como fallas, diques, zonas de corte, etc. (1989, p. 52).

En conclusión, al usar la clasificación geomecánica RMR, en primera instancia es necesario dividir la zona de estudio en dominios estructurales casi homogéneos con el fin de hallar un valor de RMR con mayor exactitud. En las Tablas 1, 2 y 3 se muestran los criterios utilizados para la valoración y clasificación del macizo rocoso.

Tabla 1. Parámetros de clasificación y sus respectivos puntajes.

| Parameter | | Ranges of Values | | | | | | | |
|-----------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----|----|
| 1 | Strength of intact rock material | Point-load strength index (MPa) | >10 | 4-10 | 2-4 | 1-2 | For this low range, uniaxial compressive test is preferred | | |
| | | Uniaxial compressive strength (MPa) | >250 | 100-250 | 50-100 | 25-50 | 5-25 | 1-5 | <1 |
| | Rating | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 | |
| 2 | Drill core quality RQD (%) | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 | | | |
| | Rating | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | | |
| 3 | Spacing of discontinuities | >2 m | 0.6-2 m | 200-600 mm | 60-200 mm | <60 mm | | | |
| | Rating | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | | |
| 4 | Condition of discontinuities | Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock | Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls | Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered wall | Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous | Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous | | | |
| | | Rating | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | |
| 5 | Groundwater | Inflow per 10 m tunnel length (L/min) | None | <10 | 10-25 | 25-125 | >125 | | |
| | | Ratio $\frac{\text{Joint water pressure}}{\text{Major principal stress}}$ | 0 | <0.1 | 0.1-0.2 | 0.2-0.5 | >0.5 | | |
| | General conditions | Completely dry | Damp | Wet | Dripping | Flowing | | | |
| | Rating | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | | |

Fuente: Z. T. Bieniawski, *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, And Petroleum Engineering*, Canadá: John Wiley & Sons, 1989, p. 54.

Tabla 2. Ajuste de puntaje para la orientación de las discontinuidades.

| Strike and Dip Orientations of Discontinuities | | Very Favorable | Favorable | Fair | Unfavorable | Very Unfavorable |
|------------------------------------------------|-------------------|----------------|-----------|------|-------------|------------------|
| Ratings | Tunnels and mines | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 |
| | Foundations | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 |
| | Slopes | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 |

Fuente: Bieniawski (1989, p. 55).

Tabla 3. Clases de macizos rocosos determinadas a partir de la puntuación total.

| Rating | 100 ← 81 | 80 ← 61 | 60 ← 41 | 40 ← 21 | <20 |
|-------------|----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| Class no. | I | II | III | IV | V |
| Description | Very good rock | Good rock | Fair rock | Poor rock | Very poor rock |

Fuente: Bieniawski (1989, p. 55).

2.4.2 Sistema Q.

El Sistema Q fue desarrollado en Noruega en 1974 por Barton et al., integrantes todos ellos del Instituto Geotécnico Noruego. Su desarrollo representó una importante contribución a las clasificaciones de masas rocosas por varias razones: el sistema se propuso sobre la base de un análisis de 212 casos de túneles escandinavos, es un sistema de clasificación cuantitativa y, además, es un sistema de ingeniería que facilita el diseño de los soportes de los túneles (Bieniawski, 1989).

Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes seis parámetros (Bieniawski, 1989):

- *RQD*: “Rock Quality Designation”.
- *Jn*: Número de familia de diaclasas.
- *Jr*: Rugosidad de las diaclasas.
- *Ja*: Meteorización de las diaclasas.
- *Jw*: Coeficiente reductor que tiene en cuenta la presencia de agua.
- *SRF*: “Stress Reduction Factor”; es el factor de reducción por tensión, el cual depende principalmente de las tensiones existentes en el macizo rocoso.

De acuerdo con estos parámetros se define la siguiente ecuación, la cual contiene tres relaciones en ella, con el fin de hallar el índice de calidad Q:

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

Como lo explican Ramírez y Alejano:

El primer cociente, representa el tamaño de los bloques, J_r/J_a ; permite estimar la resistencia al corte entre bloques y, por último, J_w/SRF indica el estado tensional del macizo rocoso [...] La principal aplicación de los sistemas de clasificación mencionados anteriormente es la selección del sostenimiento de túneles, sin embargo, con el transcurso del tiempo se ha extendido a la minería subterránea (2004, p. 157).

A continuación, se muestran las tablas con los puntajes para cada parámetro, con el fin de calcular el valor Q.

Tabla 4. Valores – RQD

| I RQD (Rock Quality Designation) | | | RQD |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------|--------|
| A | Very poor | (> 27 joints per m ³) | 0-25 |
| B | Poor | (20-27 joints per m ³) | 25-50 |
| C | Fair | (13-19 joints per m ³) | 50-75 |
| D | Good | (8-12 joints per m ³) | 75-90 |
| E | Excellent | (0-7 joints per m ³) | 90-100 |
| Note: i) Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0) the value 10 is used to evaluate the Q-value ii) RQD-intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc., are sufficiently accurate | | | |

Fuente: NGI, *Using the Q-System, Rock mass classification and support design*, Oslo, 2015, p. 12.

Tabla 5. Valores - J_n

| 2 Joint set number | | J_n |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------|
| A | Massive, no or few joints | 0.5-1.0 |
| B | One joint set | 2 |
| C | One joint set plus random joints | 3 |
| D | Two joint sets | 4 |
| E | Two joint sets plus random joints | 6 |
| F | Three joint sets | 9 |
| G | Three joint sets plus random joints | 12 |
| H | Four or more joint sets, random heavily jointed "sugar cube", etc | 15 |
| J | Crushed rock, earth like | 20 |
| Note: i) For tunnel intersections, use $3 \times J_n$ ii) For portals, use $2 \times J_n$ | | |

Fuente: NGI (2015, p. 15).

Tabla 6. Valores Jr

| 3 Joint Roughness Number | | J _r |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <p>a) Rock-wall contact, and b) Rock-wall contact before 10 cm of shear movement</p> | | |
| A | Discontinuous joints | 4 |
| B | Rough or irregular, undulating | 3 |
| C | Smooth, undulating | 2 |
| D | Slickensided, undulating | 1.5 |
| E | Rough, irregular, planar | 1.5 |
| F | Smooth, planar | 1 |
| G | Slickensided, planar | 0.5 |
| <p>Note: i) Description refers to small scale features and intermediate scale features, in that order</p> | | |
| <p>c) No rock-wall contact when sheared</p> | | |
| H | Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact when sheared | 1 |
| <p>Note: ii) Add 1 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m (dependent on the size of the underground opening) iii) J_r = 0.5 can be used for planar slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented in the estimated sliding direction</p> | | |

Fuente: NGI (2015, p. 19).

Tabla 7. Valores – Ja

| 4 Joint Alteration Number | | Φ_r approx. | J_a |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|
| a) Rock-wall contact (no mineral fillings, only coatings) | | | |
| A | Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote. | | 0.75 |
| B | Unaltered joint walls, surface staining only. | 25-35° | 1 |
| C | Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings; sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc. | 25-30° | 2 |
| D | Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening). | 20-25° | 3 |
| E | Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, talc, gypsum, graphite, etc., and small quantities of swelling clays. | 8-16° | 4 |
| b) Rock-wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings) | | | |
| F | Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc. | 25-30° | 4 |
| G | Strongly over-consolidated, non-softening, clay mineral fillings (continuous, but <5 mm thickness). | 16-24° | 6 |
| H | Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, but <5 mm thickness). | 12-16° | 8 |
| J | Swelling-clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, but <5 mm thickness). Value of J_a depends on percent of swelling clay-size particles. | 6-12° | 8-12 |
| c) No rock-wall contact when sheared (thick mineral fillings) | | | |
| K | Zones or bands of disintegrated or crushed rock. Strongly over-consolidated. | 16-24° | 6 |
| L | Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Medium or low over-consolidation or softening fillings. | 12-16° | 8 |
| M | Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Swelling clay. J_a depends on percent of swelling clay-size particles. | 6-12° | 8-12 |
| N | Thick continuous zones or bands of clay. Strongly over-consolidated. | 12-16° | 10 |
| O | Thick, continuous zones or bands of clay. Medium to low over-consolidation. | 12-16° | 13 |
| P | Thick, continuous zones or bands with clay. Swelling clay. J_a depends on percent of swelling clay-size particles. | 6-12° | 13-20 |

Fuente: NGI (2015, p. 22).

Tabla 8.Valores – J_w

| 5 Joint Water Reduction Factor | | J_w |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| A | Dry excavations or minor inflow (humid or a few drips) | 1.0 |
| B | Medium inflow, occasional outwash of joint fillings (many drips/"rain") | 0.66 |
| C | Jet inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints | 0.5 |
| D | Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings | 0.33 |
| E | Exceptionally high inflow or water pressure decaying with time. Causes outwash of material and perhaps cave in | 0.2-0.1 |
| F | Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay. Causes outwash of material and perhaps cave in | 0.1-0.05 |
| Note: i) Factors C to F are crude estimates. Increase J_w if the rock is drained or grouting is carried out ii) Special problems caused by ice formation are not considered | | |

Fuente: NGI (2015, p. 24).

Tabla 9. Valores - SRF

| 6 Stress Reduction Factor | | | SRF | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| a) Weak zones intersecting the underground opening, which may cause loosening of rock mass | | | | |
| A | Multiple occurrences of weak zones within a short section containing clay or chemically disintegrated, very loose surrounding rock (any depth), or long sections with incompetent (weak) rock (any depth). For squeezing, see 6L and 6M | | 10 | |
| B | Multiple shear zones within a short section in competent clay-free rock with loose surrounding rock (any depth) | | 7.5 | |
| C | Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth ≤ 50m) | | 5 | |
| D | Loose, open joints, heavily jointed or "sugar cube", etc. (any depth) | | 5 | |
| E | Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth > 50m) | | 2.5 | |
| Note: i) Reduce these values of SRF by 25-50% if the weak zones only influence but do not intersect the underground opening | | | | |
| b) Competent, mainly massive rock, stress problems | | σ_c / σ_1 | σ_3 / σ_c | SRF |
| F | Low stress, near surface, open joints | >200 | <0.01 | 2.5 |
| G | Medium stress, favourable stress condition | 200-10 | 0.01-0.3 | 1 |
| H | High stress, very tight structure. Usually favourable to stability. May also be unfavourable to stability dependent on the orientation of stresses compared to jointing/weakness planes* | 10-5 | 0.3-0.4 | 0.5-2 2-5* |
| J | Moderate spalling and/or slabbing after > 1 hour in massive rock | 5-3 | 0.5-0.65 | 5-50 |
| K | Spalling or rock burst after a few minutes in massive rock | 3-2 | 0.65-1 | 50-200 |
| L | Heavy rock burst and immediate dynamic deformation in massive rock | <2 | >1 | 200-400 |
| Note: ii) For strongly anisotropic virgin stress field (if measured); when $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c to $0.75 \sigma_c$. When $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduce σ_c to $0.5 \sigma_c$, where σ_c = unconfined compression strength, σ_1 and σ_3 are the major and minor principal stresses, and σ_3 = maximum tangential stress (estimated from elastic theory) | | | | |
| iii) When the depth of the crown below the surface is less than the span; suggest SRF increase from 2.5 to 5 for such cases (see F) | | | | |
| c) Squeezing rock: plastic deformation in incompetent rock under the influence of high pressure | | | σ_3 / σ_c | SRF |
| M | Mild squeezing rock pressure | 1-5 | | 5-10 |
| N | Heavy squeezing rock pressure | >5 | | 10-20 |
| Note: iv) Determination of squeezing rock conditions must be made according to relevant literature (i.e. Singh et al., 1992 and Bhasin and Grimstad, 1996) | | | | |
| d) Swelling rock: chemical swelling activity depending on the presence of water | | | | SRF |
| O | Mild swelling rock pressure | | | 5-10 |
| P | Heavy swelling rock pressure | | | 10-15 |

Fuente: NGI (2015, p. 26).

2.5 Análisis de cuñas.

Con el fin de hacer una introducción en el tema, es importante comenzar desde lo general como lo son los mecanismos de rotura. Este concepto se refiere a la descripción del proceso físico que se produce en un macizo rocoso con el aumento de la carga o con la disminución de la resistencia, y cuando el movimiento empieza y se propaga a lo largo de él. Cada mecanismo de rotura tiene una metodología específica para cuantificar la estabilidad mediante el coeficiente de seguridad. (Melentijevic, 2005).

Existen diferentes tipos de rotura; para el caso objeto de estudio interesa la rotura por cuña, la cual es un tipo de deslizamiento traslacional que está controlado por dos o más discontinuidades (estratificación, esquistosidad, diaclasas y fallas, entre otras). Este tipo de deslizamiento generalmente se da en macizos rocosos resistentes y con discontinuidades bien marcadas (Ramírez y Alejano, 2004).

Cuando la cuña está formada por la intersección de dos discontinuidades o superficies de debilidad, si ambas superficies se inclinan en sentido diferente se denomina cuña directa (Figura 8 A). Cuando la inclinación de dichas discontinuidades está en el mismo sentido, reciben el nombre de cuña inversa (Figura 8 B) (Ramírez y Alejano, 2004).

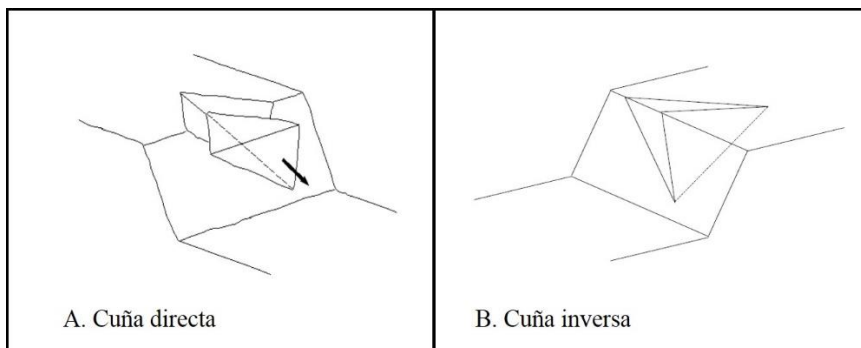


Figura 10. Vista en perspectiva de una cuña directa y cuña inversa. Fuente: P. Ramírez y L. Alejano, *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*, Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2004.

Una o más de estas cuñas pueden caer o deslizarse de la superficie si los planos delimitadores son continuos o si se rompen los puentes de roca a lo largo de las discontinuidades (Ver figura 9) (Hoek, 2000).

A menos que se tomen medidas para sostener estas cuñas sueltas, la estabilidad de la parte posterior y de las paredes de la abertura puede deteriorarse rápidamente. Cada cuña que se deja

caer o deslizarse causará una reducción en la contención y el entrelazamiento de la masa rocosa y esto, a su vez, permitirá que caigan otras cuñas (Hoek, 2000).

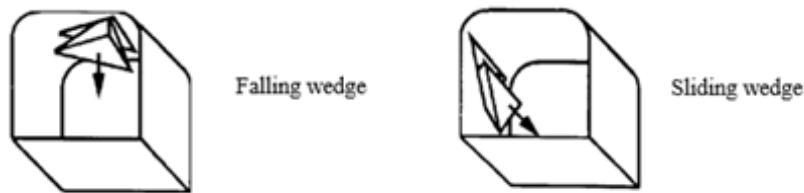


Figura 11. Cuña descendente y cuña deslizante. Fuente: E. Hoek (2000). *Structurally controlled instability in tunnels. En Rock Engineering. Course notes, p. 73.*

De acuerdo con Hoek:

El tamaño y la forma de las cuñas potenciales en la masa rocosa que rodea una abertura dependen del tamaño, la forma y la orientación de la abertura y también de la orientación de los conjuntos de discontinuidades significativos. La geometría tridimensional del problema requiere un conjunto de cálculos relativamente tediosos. Aunque estos pueden realizarse a mano, es mucho más eficiente utilizar uno de los programas de ordenador disponibles. Uno de estos programas, llamado UNWEDGE, fue desarrollado específicamente para su uso en la minería subterránea de roca dura (2000, p. 74).

Un rasgo característico de las fallas de cuña en las rocas en bloque es que se presenta muy poco movimiento en la masa rocosa antes de la falla de la cuña. En el caso de una cuña de techo que se cae, la falla puede ocurrir tan pronto como la base de la cuña esté completamente expuesta por la excavación de la abertura. En el caso de las cuñas laterales, el deslizamiento de unos pocos milímetros a lo largo de un plano o de la línea de intersección de dos planos es generalmente suficiente para superar la resistencia máxima de estas superficies. Esto indica que el movimiento a lo largo de las superficies debe ser minimizado. En consecuencia, el sistema de apoyo tiene que proporcionar una respuesta “rígida” al movimiento (Hoek, 2000).

Esto se logra por medio del sostenimiento adecuado y para ello el software Unwedge incluye una serie de opciones para el diseño de soportes en excavaciones subterráneas. Estos incluyen: pernos de patrón, desde una posición de perforación seleccionada o colocados normalmente en la superficie de excavación; y pernos puntuales, en los que la ubicación y longitud de los pernos son decididas por el usuario para cada instalación. Se pueden seleccionar pernos anclados mecánicamente con placas frontales o pernos o cables totalmente inyectados para proporcionar soporte. Además, se puede aplicar una capa de hormigón proyectado a la superficie de la excavación.

Grosso modo, para realizar un análisis de estabilidad es necesario el procesamiento de los datos estructurales con el fin de identificar y evaluar posibles cuñas, determinar el coeficiente de seguridad para cada una de ellas y finalmente definir el sostenimiento adecuado para este caso de estudio.

3. Resultados

Antes de presentar los resultados de la clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel veintiuno de la mina La Maruja es preciso mostrar el mapa de las estaciones realizadas durante la etapa de campo y, además, los nombres de cada una de las vetas (Figura 11).

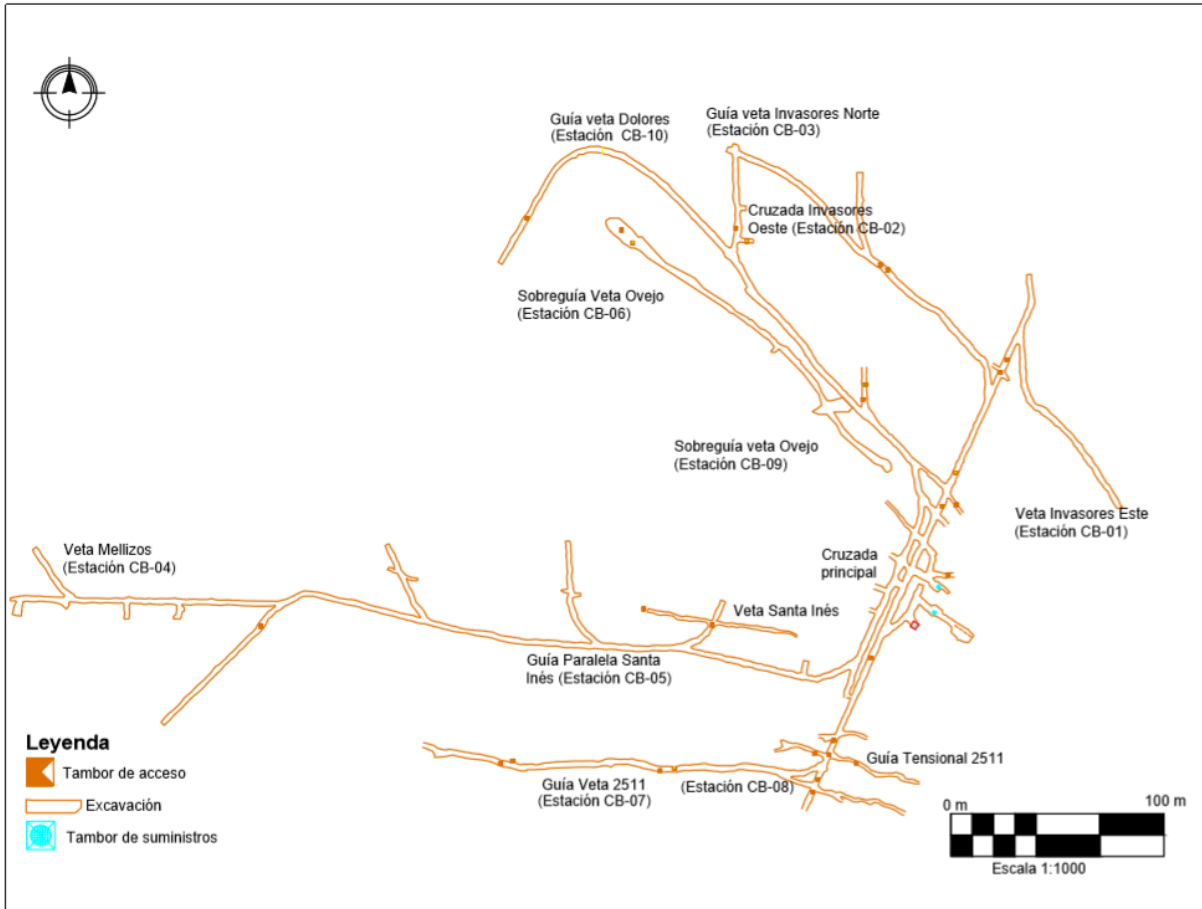


Figura 12. Mapa de estaciones. Fuente: Elaboración propia por medio del software AutoCAD.

Debido a las variaciones geotécnicas notables entre las zonas mineralizadas alteradas y la roca encajante, este trabajo mostrará siempre los datos y análisis por separado, pues así mismo se debe concebir para las recomendaciones de soporte y su sistema de explotación.

3.1 Resistencia de la roca intacta.

Debido a la falta de presupuesto para realizar ensayos de laboratorio, la resistencia de la roca intacta fue estimada a partir del rebote del martillo de Schmidt, el cual fue facilitado a los autores de este proyecto por la Universidad EAFIT. A continuación, se muestra una tabla para cada

estación con los datos utilizados para hallar la resistencia a la compresión uniaxial (RCU). En campo, se hizo una lectura directa de la resistencia al rebote de la superficie rocosa arrojada por el Martillo de Schmidt, teniendo en cuenta la orientación del esclerómetro para cada medida. Se tomaron diez medidas para cada discontinuidad analizada, eliminando los cinco valores más bajos y calculando un promedio con los otros cinco datos restantes, lo que dio como resultado un promedio de rebote.

Es importante aclarar que hubo datos estructurales tomados dentro de algunas estaciones (CB 03, CB 10), en las cuales no fue posible hallar el RCU por medio del esclerómetro debido a que la veta, en esos lugares específicos, se encontraba muy arcillosa. No obstante, pudo medirse la resistencia por medio del martillo geológico y con base en la tabla del *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (ISRM, 1981) se pudo determinar que pertenecen a las clases R1 y R2 con resistencias de 1-5 Mpa y 5-25 Mpa, respectivamente.

Las rocas con menor RCU son las siguientes: veta Invasores Este con una resistencia de 51,1 Mpa; veta Los Mellizos (61,6 Mpa); veta Invasores Norte (67,6 Mpa) y veta Dolores (54,3 Mpa), las cuales son denominadas vetas blandas. En estas mismas estaciones las rocas se encontraban en el rango de medianamente meteorizadas a muy meteorizadas, además, en algunos lugares estaban húmedas y con goteo, siendo esta situación una de las posibles causas para disminuir la resistencia de la roca.

Por otro lado, las rocas que tienen mayor RCU son las que se encuentran en la cruzada Invasores Oeste (144,3 Mpa), en la paralela a la veta Santa Inés (146,7 Mpa), en la sobreguía veta Oveja (con 115,1 Mpa en la estación CB-06 y 130 Mpa en la estación CB-09) y, finalmente, en la veta 2511 (con 162,2 Mpa en la estación CB-07 y 104,4 Mpa en la estación CB-08).

Tabla 10. RCU Veta Invasores Este (CB - 01)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m ³) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|---------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 01 | Veta Invasores Este | 26,47 | 270 | 74 | 19,4 | 44,0 | 51,1 |
| | | | 090 | 80 | 18,2 | 42,0 | |
| | | | 242 | 79 | 18,2 | 42,0 | |
| | | | 205 | 79 | 20,8 | 47,0 | |
| | | | 195 | 70 | 44,6 | 92,0 | |
| | | | 205 | 86 | 31,6 | 69,0 | |
| | | | 190 | 74 | 32,0 | 70,0 | |
| | | | 203 | 79 | 20,6 | 44,0 | |
| | | | 356 | 70 | 18,4 | 43,0 | |
| | | | 190 | 40 | 12,0 | 31,0 | |
| | | | 260 | 84 | 23,4 | 38,0 | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. RCU Cruzada Invasores Oeste (CB - 02)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m ³) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|-------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 02 | Cruzada Invasores Oeste | 26,77 | 335 | 68 | 38,0 | 100,0 | 144,3 |
| | | | 013 | 88 | 30,0 | 70,0 | |
| | | | 000 | 76 | 41,0 | 125,0 | |
| | | | 180 | 84 | 56,0 | 255,0 | |
| | | | 005 | 70 | 43,0 | 130,0 | |
| | | | 020 | 89 | 41,0 | 125,0 | |
| | | | 020 | 89 | 52,0 | 210,0 | |
| | | | 330 | 72 | 43,0 | 130,0 | |
| | | | 020 | 89 | 49,0 | 185,0 | |
| | | | 015 | 88 | 37,0 | 110,0 | |
| | | | 037 | 80 | 36,0 | 107,0 | |
| | | | 039 | 60 | 43,0 | 140,0 | |
| | | | 309 | 82 | 56,0 | 250,0 | |
| | | | 310 | 74 | 55,0 | 249,0 | |
| | | | 160 | 20 | 30,0 | 60,0 | |
| | | | 240 | 69 | 53,0 | 210,0 | |
| | | | 038 | 89 | 45,0 | 145,0 | |
| | | | 65 | 88 | 42,0 | 126,0 | |
| | | | 180 | 80 | 52,0 | 205,0 | |
| | | | 205 | 79 | 41,0 | 125,0 | |
| | | | 180 | 20 | 38,0 | 100,0 | |
| | | | 300 | 70 | 43,0 | 132,0 | |
| | | | 25 | 86 | 37,0 | 95,0 | |
| 220 | 81 | 42,0 | 126,0 | | | | |
| 215 | 32 | 39,0 | 110,0 | | | | |
| 195 | 45 | 45,0 | 150,0 | | | | |
| 25 | 85 | 42,0 | 126,0 | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. RCU Veta Invasores Norte (CB - 03)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m ³) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|----------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 03 | Veta Invasores Norte | 27,45 | 018 | 82 | 24,0 | 45,0 | 67,6 |
| | | | 010 | 70 | 34,0 | 78,0 | |
| | | | 025 | 74 | 35,0 | 80,0 | |
| | | | 240 | 72 | 25,6 | 65,0 | |
| | | | 030 | 80 | 28,0 | 70,0 | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. RCU veta Los Mellizos (CB - 04)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m ³) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|-------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 04 | Veta Los Mellizos | 24,51 | 055 | 70 | 37,0 | 65,0 | 61,6 |
| | | | 160 | 60 | 36,8 | 64,0 | |
| | | | 057 | 86 | 31,0 | 58,0 | |
| | | | 074 | 80 | 33,0 | 60,0 | |
| | | | 214 | 80 | 38,0 | 66,0 | |
| | | | 250 | 80 | 34,0 | 57,0 | |
| | | | 074 | 80 | 37,0 | 62,0 | |
| | | | 090 | 70 | 35,0 | 67,0 | |
| | | | 265 | 70 | 34,0 | 66,0 | |
| | | | 067 | 79 | 33,0 | 65,0 | |
| | | | 250 | 30 | 35,0 | 67,0 | |
| | | | 335 | 78 | 30,0 | 54,0 | |
| | | | 310 | 74 | 29,0 | 50,0 | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. RCU paralela a veta Santa Inés (CB - 05)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m3) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|----------------------------|------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 05 | Paralela a veta Santa Inés | 24,02 | 170 | 70 | 62,0 | 175,0 | 146,7 |
| | | | 007 | 52 | 70,0 | 160,0 | |
| | | | 017 | 52 | 68,0 | 158,0 | |
| | | | 190 | 88 | 60,0 | 175,0 | |
| | | | 004 | 70 | 62,0 | 160,0 | |
| | | | 060 | 69 | 61,0 | 160,0 | |
| | | | 185 | 67 | 58,0 | 165,0 | |
| | | | 050 | 72 | 65,0 | 160,0 | |
| | | | 068 | 50 | 66,0 | 160,0 | |
| | | | 140 | 60 | 48,0 | 110,0 | |
| | | | 164 | 60 | 56,0 | 150,0 | |
| | | | 142 | 60 | 47,0 | 115,0 | |
| | | | 352 | 69 | 57,0 | 170,0 | |
| | | | 276 | 76 | 44,0 | 160,0 | |
| | | | 214 | 60 | 60,0 | 170,0 | |
| | | | 065 | 80 | 54,0 | 130,0 | |
| | | | 165 | 79 | 57,0 | 148,0 | |
| | | | 160 | 66 | 60,0 | 156,0 | |
| | | | 165 | 84 | 51,0 | 120,0 | |
| | | | 143 | 80 | 53,0 | 125,0 | |
| | | | 180 | 60 | 55,0 | 130,0 | |
| | | | 215 | 60 | 55,0 | 135,0 | |
| | | | 130 | 68 | 49,0 | 120,0 | |
| | | | 215 | 86 | 62,0 | 175,0 | |
| | | | 214 | 80 | 56,0 | 140,0 | |
| | | | 150 | 60 | 58,0 | 150,0 | |
| | | | 240 | 80 | 54,0 | 130,0 | |
| | | | 145 | 60 | 62,0 | 175,0 | |
| 222 | 84 | 56,0 | 143,0 | | | | |
| 227 | 68 | 46,0 | 96,0 | | | | |
| 155 | 62 | 60,0 | 160,0 | | | | |
| 46 | 78 | 49,0 | 110,0 | | | | |
| 335 | 80 | 58,0 | 150,0 | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. RCU sobreguía veta Ovejo (CB - 06)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m3) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|----------------------|------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 06 | Sobreguía veta Ovejo | 25,88 | 065 | 74 | 52,2 | 150,0 | 115,1 |
| | | | 060 | 73 | 47,0 | 120,0 | |
| | | | 230 | 26 | 47,0 | 120,0 | |
| | | | 035 | 80 | 39,0 | 85,0 | |
| | | | 040 | 80 | 40,0 | 86,0 | |
| | | | 039 | 80 | 51,0 | 131,0 | |
| | | | 245 | 70 | 39,0 | 88,0 | |
| | | | 250 | 75 | 40,0 | 91,0 | |
| | | | 345 | 20 | 46,0 | 120,0 | |
| | | | 230 | 20 | 62,0 | 205,0 | |
| | | | 255 | 70 | 39,0 | 90,0 | |
| | | | 045 | 86 | 28,0 | 50,0 | |
| | | | 065 | 70 | 47,0 | 125,0 | |
| | | | 110 | 55 | 51,0 | 150,0 | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. RCU respaldo veta 2511 (CB - 07)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m3) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|-----------|--------------------|------------------------------------|---------------------|-------|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 07 | Respaldo veta 2511 | 25,59 | 050 | 70 | 53,0 | 140,0 | 162,2 |
| | | | 195 | 60 | 61,0 | 200,0 | |
| | | | 245 | 70 | 42,0 | 95,0 | |
| | | | 250 | 60 | 57,0 | 180,0 | |
| | | | 163 | 45 | 59,0 | 170,0 | |
| | | | 200 | 62 | 66,0 | 195,0 | |
| | | | 070 | 70 | 52,0 | 150,0 | |
| | | | 066 | 60 | 63,0 | 220,0 | |
| | | | 065 | 40 | 62,0 | 220,0 | |
| | | | 056 | 65 | 58,0 | 165,0 | |
| | | | 190 | 40 | 60,0 | 210,0 | |
| | | | 050 | 74 | 55,0 | 170,0 | |
| | | | 170 | 66 | 51,0 | 130,0 | |
| | | | 234 | 70 | 61,0 | 220,0 | |
| | | | 075 | 70 | 60,0 | 180,0 | |
| | | | 005 | 74 | 51,0 | 150,0 | |
| | | | 050 | 63 | 59,0 | 200,0 | |
| | | | 071 | 65 | 49,0 | 130,0 | |
| | | | 142 | 38 | 50,0 | 129,0 | |
| | 052 | 70 | 53,0 | 135,0 | | | |
| | 342 | 50 | 59,0 | 200,0 | | | |
| 169 | 38 | 36,0 | 69,0 | | | | |
| Veta 2511 | 30 | 035 | 50 | 33,0 | 88,0 | | |
| | | 025 | 55 | 34,0 | 90,0 | | |
| | | 075 | 60 | 49,0 | 220,0 | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. RCU veta 2511 (CB - 08)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m3) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|-------------|------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 08 | veta 2511 | 22,45 | 043 | 40 | 49,0 | 90,0 | 104,4 |
| | | | 255 | 74 | 50,0 | 92,0 | |
| | | | 184 | 70 | 45,0 | 76,0 | |
| | | | 223 | 84 | 62,0 | 145,0 | |
| | | | 155 | 38 | 50,0 | 92,0 | |
| | | | 165 | 40 | 62,0 | 148,0 | |
| | | | 260 | 70 | 49,0 | 88,0 | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. RCU sobreguía veta Ovejo (CB - 09)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m3) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|----------------------|------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 09 | Sobreguía veta Ovejo | 28,73 | 056 | 84 | 39,0 | 125,0 | 130,3 |
| | | | 196 | 60 | 44,0 | 150,0 | |
| | | | 130 | 86 | 43,0 | 135,0 | |
| | | | 225 | 86 | 50,0 | 190,0 | |
| | | | 010 | 30 | 43,0 | 130,0 | |
| | | | 190 | 60 | 46,0 | 170,0 | |
| | | | 073 | 84 | 51,0 | 200,0 | |
| | | | 180 | 53 | 31,0 | 85,0 | |
| | | | 055 | 80 | 33,0 | 80,0 | |
| | | | 264 | 80 | 36,0 | 105,0 | |
| | | | 133 | 80 | 33,0 | 80,0 | |
| | | | 190 | 60 | 46,0 | 160,0 | |
| | | | 010 | 30 | 43,0 | 130,0 | |
| | | | 080 | 20 | 41,0 | 135,0 | |
| | | | 005 | 68 | 34,0 | 80,0 | |
| 185 | 16 | 43,0 | 129,0 | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. RCU respaldo veta Dolores (CB - 10)

| Estación | Descripción | Densidad o peso específico (KN/m3) | Datos estructurales | | Rebote promedio | RCU (Mpa) | RCU promedio |
|----------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|-----|-----------------|-----------|--------------|
| | | | Dip direction | Dip | | | |
| CB - 10 | Respaldo veta Dolores | 20,2 | 246 | 58 | 38,6 | 54,0 | 54,3 |
| | | | 054 | 58 | 37,2 | 51,0 | |
| | | | 090 | 84 | 47,2 | 70,0 | |
| | | | 205 | 64 | 48,6 | 78,0 | |
| | | | 110 | 54 | 29,6 | 43,0 | |
| | | | 96 | 54 | 32,0 | 47,0 | |
| | | | 195 | 50 | 36,8 | 27,0 | |
| | | | 345 | 76 | 43,4 | 40,0 | |
| | | | 348 | 80 | 31,6 | 43,0 | |
| | | | 020 | 50 | 42,8 | 66,0 | |
| | | | 210 | 52 | 50,6 | 80,0 | |
| | | | 260 | 60 | 38,8 | 53,0 | |

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Caracterización de las discontinuidades.

3.2.1 Roca encajante.

Es considerada como roca encajante a aquella que rodea la mineralización. En el caso objeto de estudio, la roca hospedante corresponde a un pórfido dacítico-andesítico, donde la dacita presenta una textura fanerítica y la andesita una textura afanítica. Esta roca se encuentra poco afectada desde el punto de vista geotécnico en relación con las zonas mineralizadas.

3.2.1.1 Tendencias estructurales.

A partir de los datos estructurales (*Dip/Dip direction*) tomados en la etapa de campo, se hizo un análisis de la orientación de las discontinuidades para cada estación; además de combinaciones entre estas mismas. Este procedimiento se realizó a través del software DIPS (versión 5.1 de Rockscience). De este programa fue posible abstraer la siguiente información: la concentración de polos, sus respectivos planos y las posibles familias de diaclasas.

A continuación, se especifica la orientación de las discontinuidades en las respectivas estaciones.

Estación CB – 02 (Cruzada Invasores Oeste).

Aquí se muestra claramente la concentración de los datos. En este caso existen cuatro tipos, con concentraciones que varían de 7,5% a 23,23%, que muestran cuatro posibles familias principales de diaclasas, las cuales se encuentran señaladas con un recuadro de color rojo en la figura 13 y que corresponden a: 88/020, 75/306, 82/180 y 73/002.

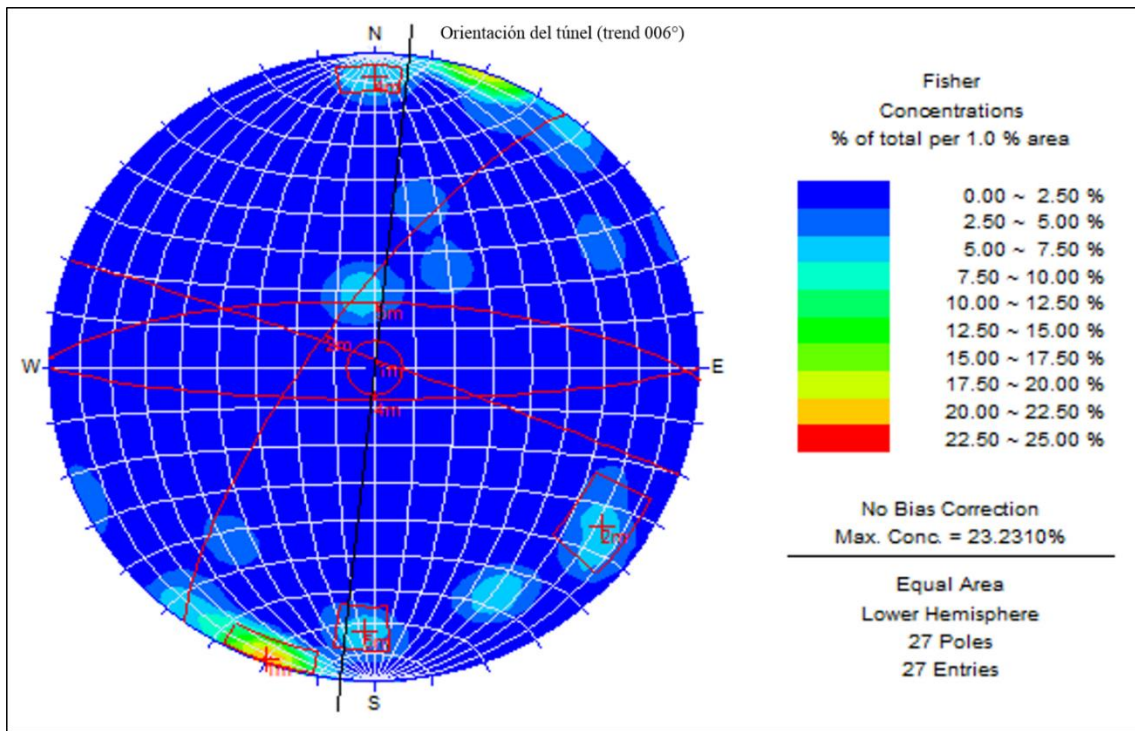


Figura 13. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-02. Fuente: Elaboración propia a partir del software Dips.²

Estación CB – 05 (paralela a veta Santa Inés).

La figura 14 muestra la concentración de los datos. En esta estación existen cinco tipos, con concentraciones que varían de 4,5% a 13,04%, que permiten identificar tres posibles familias principales de diaclasas y dos familias secundarias que corresponden a: 71/161, 75/055, 83/217, 63/219 y 52/012.

² Todas las figuras de este subcapítulo de 'Tendencias estructurales' fueron elaboradas por los autores del presente trabajo, por lo que en adelante no se volverá a indicar el dato de la fuente.

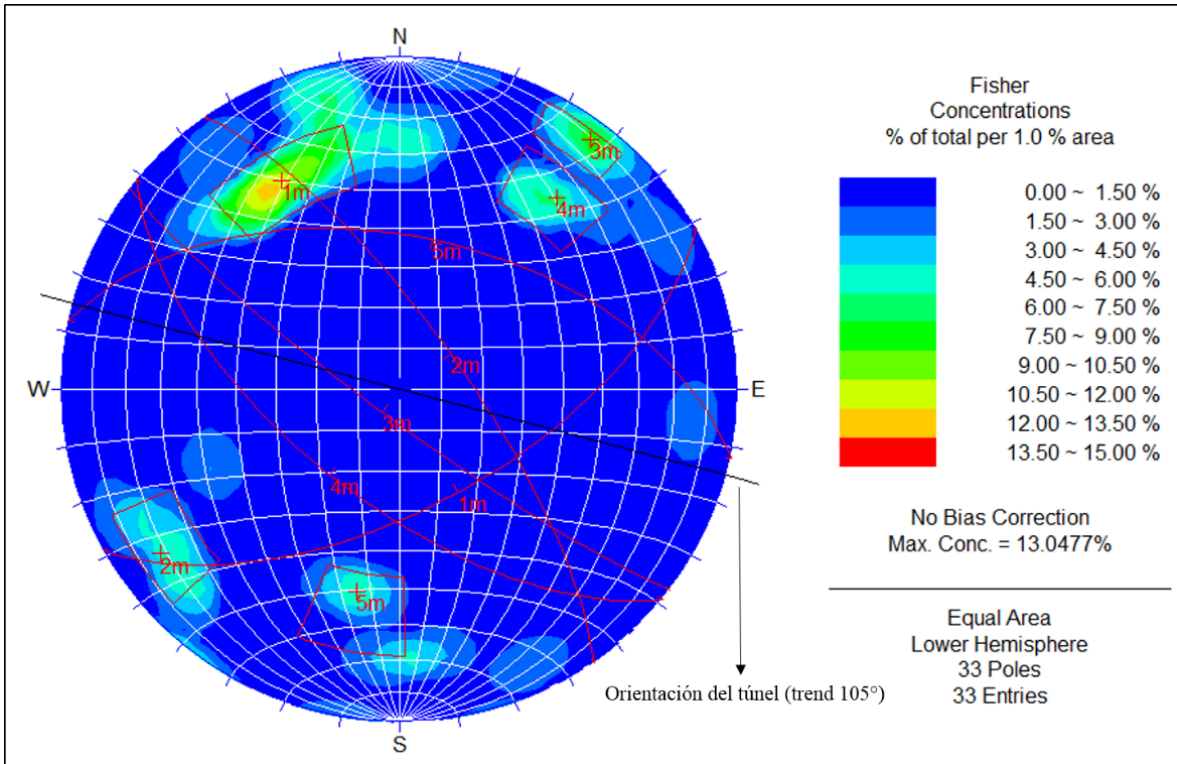


Figura 14. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-05.

Estación CB – 09 (Sobreguía veta Ovejo).

En la concentración de los datos para este segmento se identifican cuatro tipos con concentraciones que varían de 8% a 18,66% que evidencian cuatro posibles familias principales de diaclasas, las cuales se encuentran señaladas con un recuadro rojo en la figura 14 y que corresponden a: 60/192, 30/010, 82/056 y 83/131.

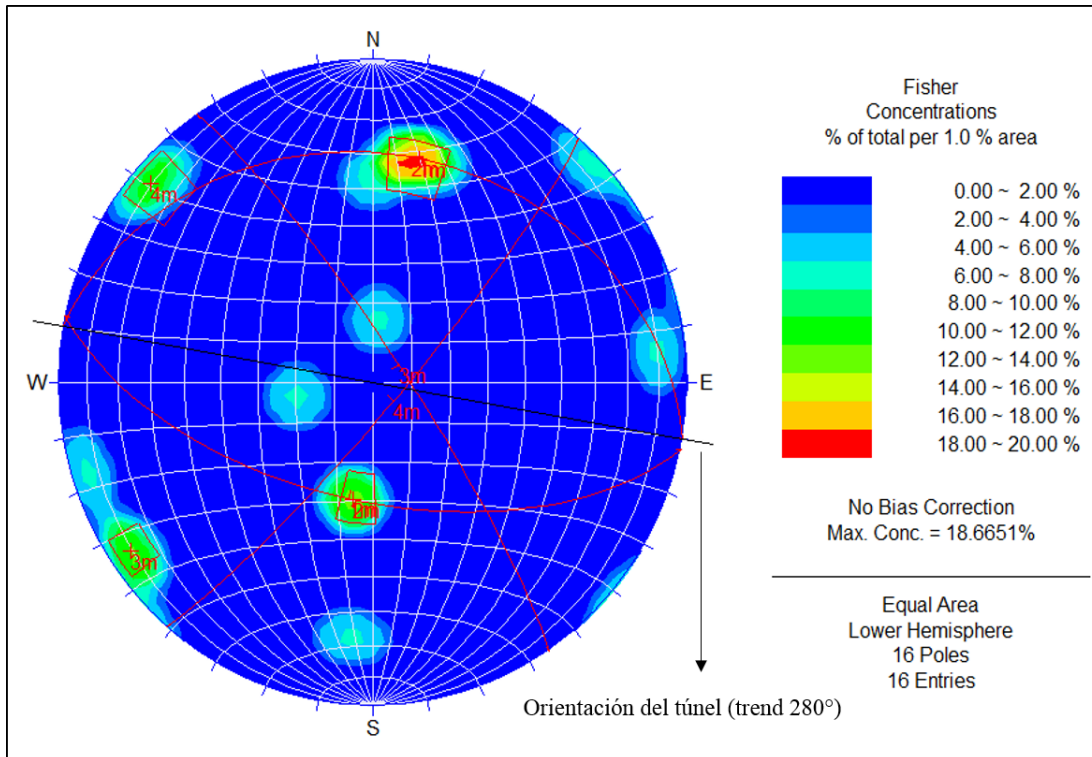


Figura 15. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-09.

Estaciones CB-02, CB-05, CB-09.

En síntesis, para la realización de la figura 16 se introdujeron todos los datos estructurales de las estaciones (en DIPS) que son consideradas como roca encajante, en la cual se muestran cinco grupos de datos con concentraciones que oscilan entre 4% y 8,37%. Como regla general, una concentración mayor a 6% por unidad de área son datos muy significativos, como lo indica Cotrina (s. f.): “Entre 4%-6% marginalmente significativo y concentraciones menores del 4% se debe tratar con cuidado”. Dado lo anterior, se identificaron cuatro familias principales de diaclasas y una familia secundaria (ver Tabla 20), las cuales están englobadas con un recuadro rojo (Figura 15).

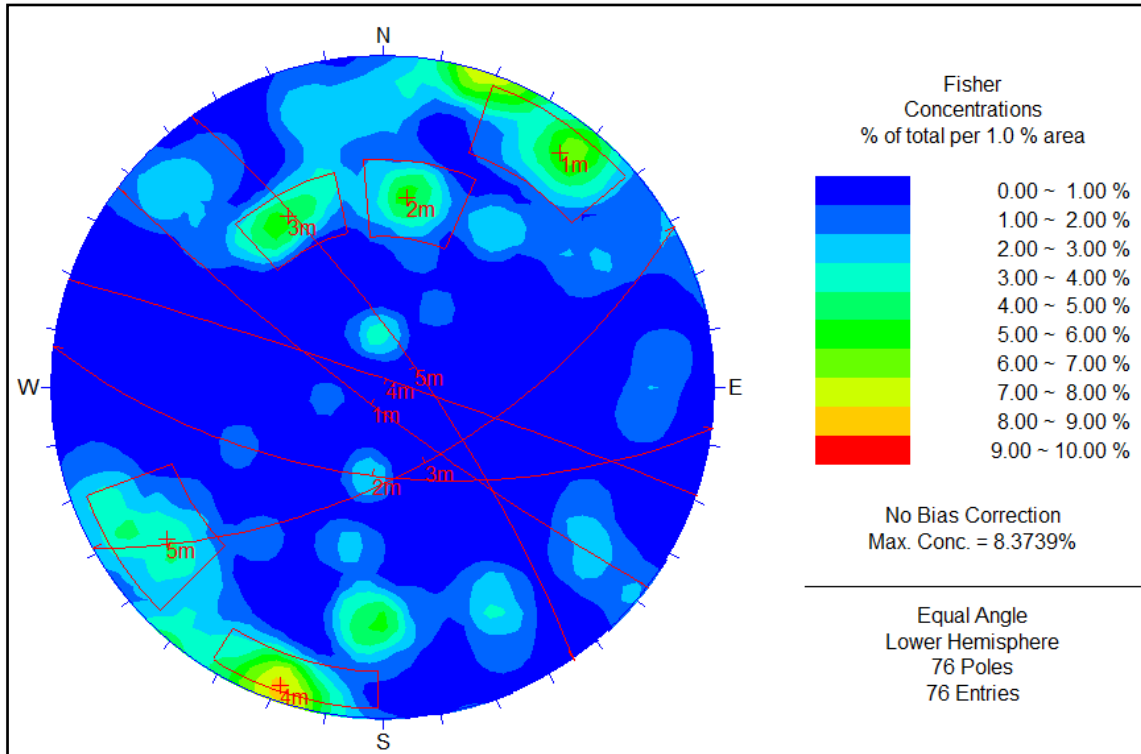


Figura 16. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos para roca encajante.

Tabla 20. Familias principales (1m,2m,3m,4m) y familia secundaria (5m)

| Orientaciones | |
|---------------|-------------------|
| ID | Dip/dip direction |
| 1 m | 83/217 |
| 2 m | 60/187 |
| 3 m | 61/151 |
| 4 m | 87/019 |
| 5 m | 77/055 |

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2 Alteración.

La alteración del macizo rocoso es un factor importante ya que si los procesos exógenos –en este caso como el agua– son intensos, generarán procesos químicos y físicos intensos dentro del macizo rocoso, lo que acelera la meteorización y aumenta la porosidad, la permeabilidad y la deformabilidad de la roca. Asimismo, se ve disminuida la resistencia de la roca que fue medida

con el martillo de Schmidt. Los datos tomados del macizo rocoso arrojan en su mayoría una alteración de 'ligera' a 'moderada', evidenciada por baja permeabilidad y buena resistencia.

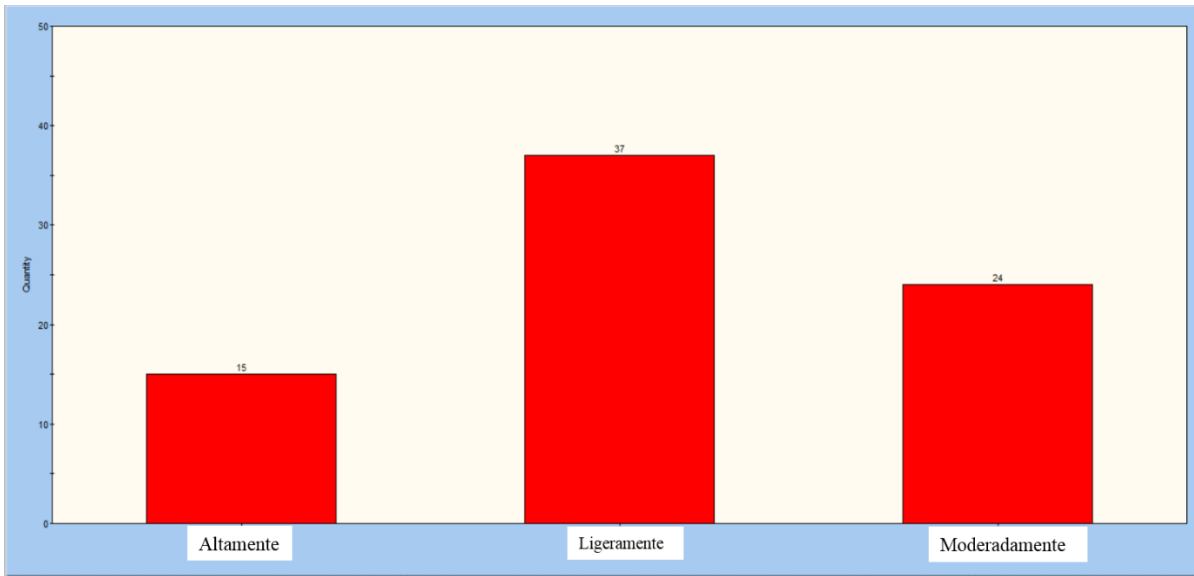


Figura 17. Histograma del parámetro alteración. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.3 Persistencia.

La persistencia hace referencia a la continuidad o extensión en tamaño de una diaclasa en el macizo rocoso, por lo que es difícil de cuantificar, además de que esta puede ser de mayor longitud que el afloramiento. Las persistencias menores a 1m y entre 1-3 m son las más comunes dentro del macizo rocoso, en el nivel 21, según estos rangos anteriores, las persistencias se ubican entre 'muy baja' y 'baja continuidad'. En consecuencia, la estabilidad de la roca encajante es mayor.

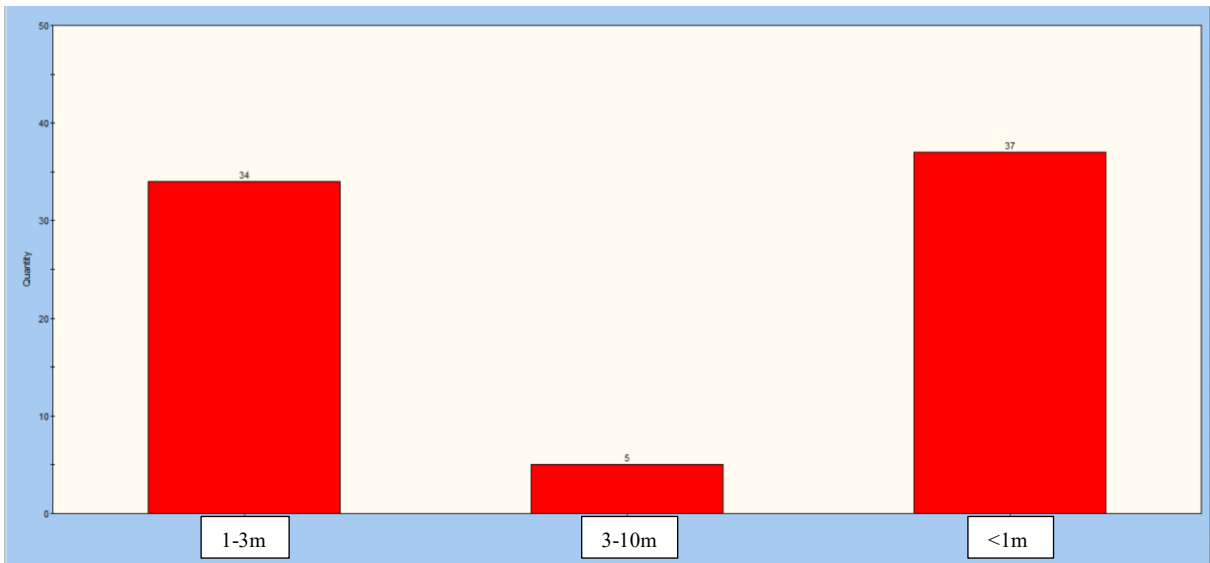


Figura 18. Histograma del Parámetro de persistencia. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.4 Abertura.

Este parámetro hace referencia a la separación entre las discontinuidades. La roca encajante se mueve en todos los rangos de abertura, no obstante, las diaclasas en su mayoría son angostas –de 0.1 a 1 mm– seguidas por las abiertas –entre 1-5 mm–. De este modo, la estabilidad del macizo rocoso es mayor que la estabilidad en las zonas mineralizadas, por el predominio de diaclasas angostas.

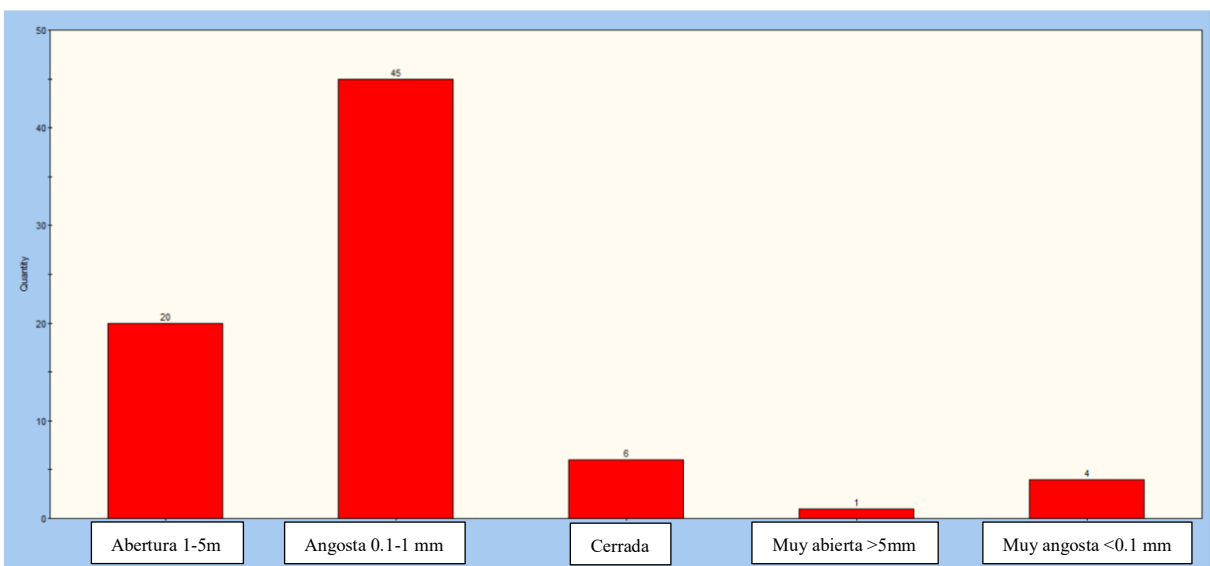


Figura 19. Histograma del parámetro abertura. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.5 Rugosidad.

Las irregularidades tienen gran influencia en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y en el factor de seguridad de las cuñas, ya que pueden controlar las posibles direcciones de movimiento. La competencia de la roca encajante es favorecida por este parámetro, puesto que la mayoría de las discontinuidades son 'rugosas' y 'muy rugosas'.

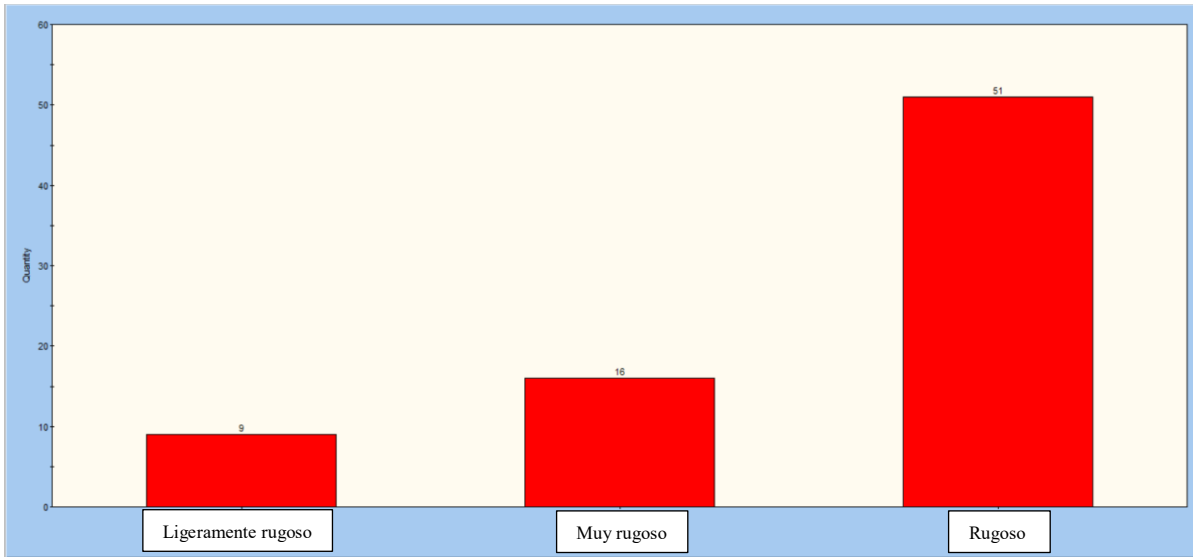


Figura 20. Histograma del parámetro rugosidad. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.6 Relleno.

El relleno está en cierta medida relacionado con la apertura, ya que corresponde a los materiales que se alojan en los espacios de las discontinuidades. En cuanto a la roca encajante, la moda para este parámetro es <5 mm, la cual se ubica en 'relleno duro', lo que indica una mayor competencia de la roca caja.

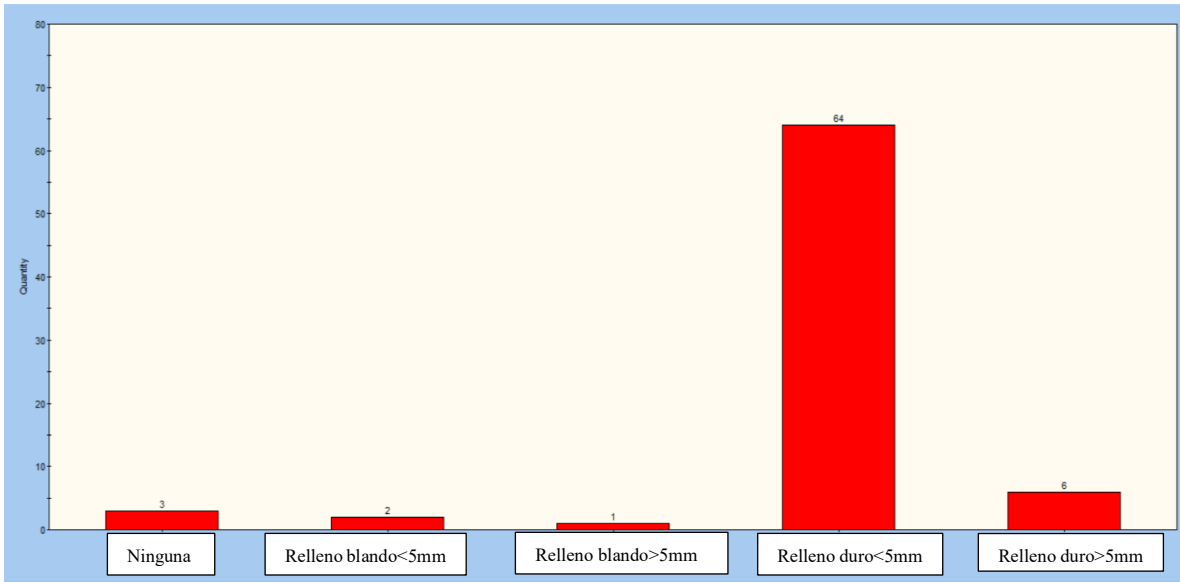


Figura 21. Histograma del parámetro relleno. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.7 Comportamiento del agua.

La permeabilidad secundaria es la responsable de que el agua fluya entre las discontinuidades, factor que facilita la alteración de la roca e influye en la resistencia al corte ya que la disminuye. Para las discontinuidades de lo considerado como roca encajante, la mayor parte de las diaclasas se encuentran entre 'completamente seco' y 'húmedo'. El comportamiento del agua tiene una relación con el parámetro *alteración*, lo cual se evidencia en el histograma de la Figura 16.

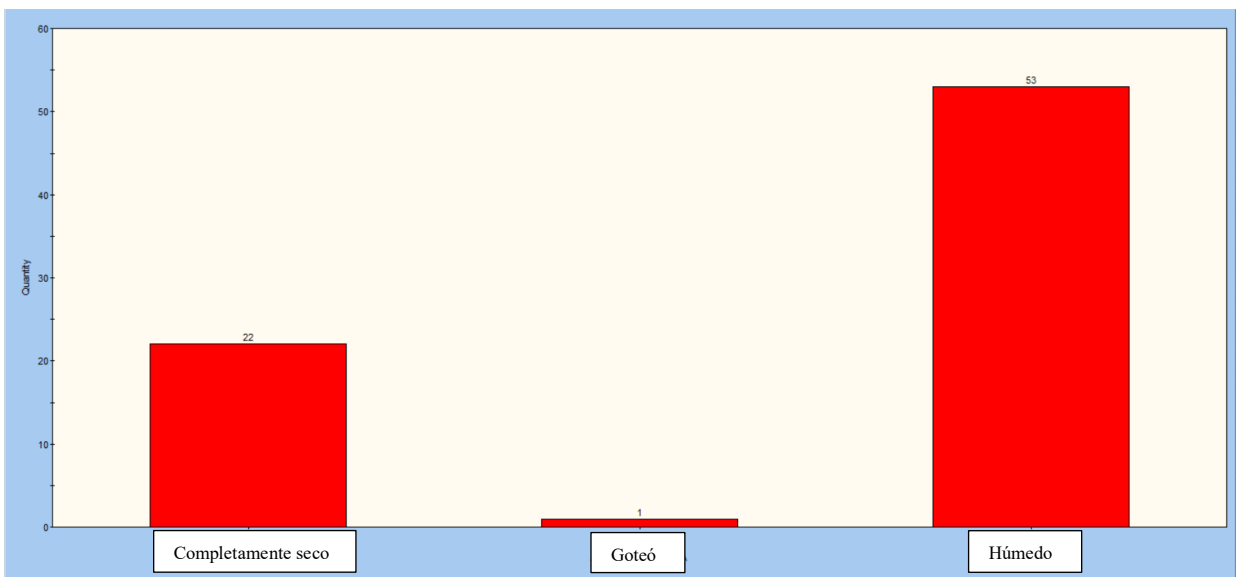


Figura 22. Histograma del parámetro comportamiento del agua. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Zonas mineralizadas.

Una veta es una estructura o franja que puede estar formada por la fisura, fractura o grieta abierta sobre las rocas de la corteza terrestre, en este caso rocas ácidas como la dacita y andesita. El relleno de esta sustancia mineral es producto de fluidos hidrotermales que, en su mayoría, están compuestas por sulfuros masivos para el cuerpo de veta. Por otra parte, las zonas de veta están dispuestas de forma paralela y anastomosada por venas y venillas rellenas por arcillas, sulfuros, cuarzo y calcita. Estas zonas son fáciles de distinguir debido a la presencia de las alteraciones hidrotermales.

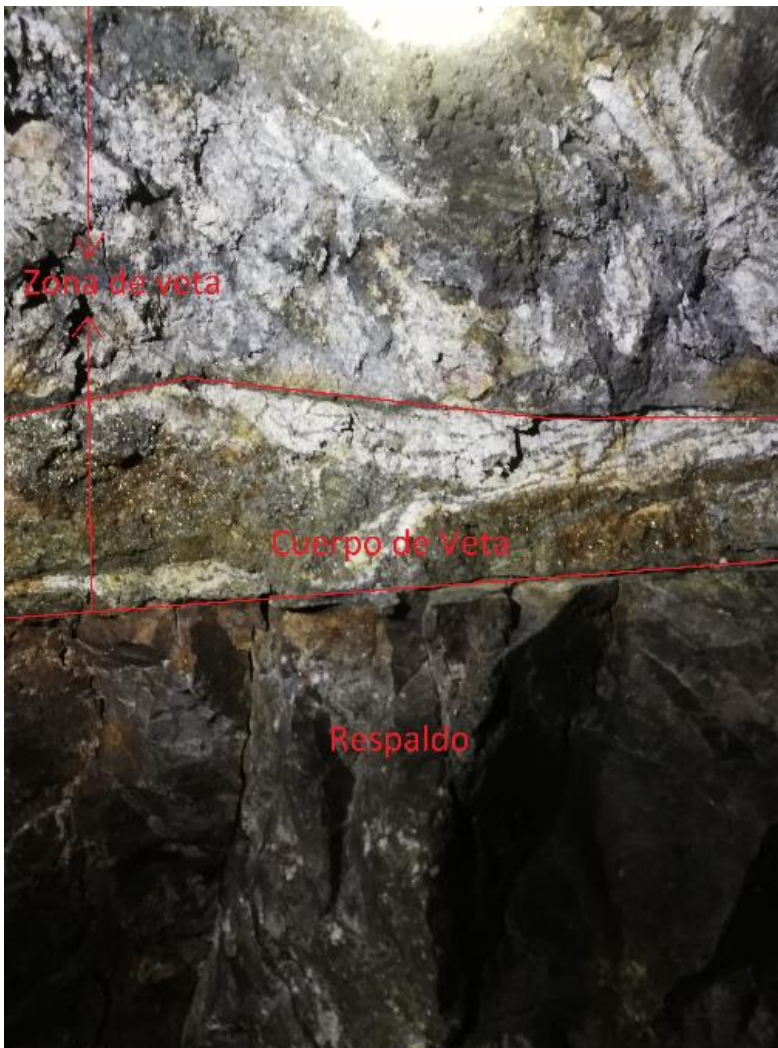


Figura 23. Fotografía tomada en la veta Santa Inés, en la cual se señala la zona de veta, el cuerpo de veta y el respaldo o roca encajante.

3.2.2.1 Tendencias estructurales.

Estación CB-01 (veta Invasores Este).

En este segmento de la excavación existen tres agrupaciones de datos, con concentraciones que varían de 6% a 11,08%. Como resultado se identificaron cuatro posibles familias principales de diaclasas, las cuales se encuentran señaladas con un recuadro rojo (Figura 24). Estas familias corresponden a: 81/204, 45/228 y 83/044.

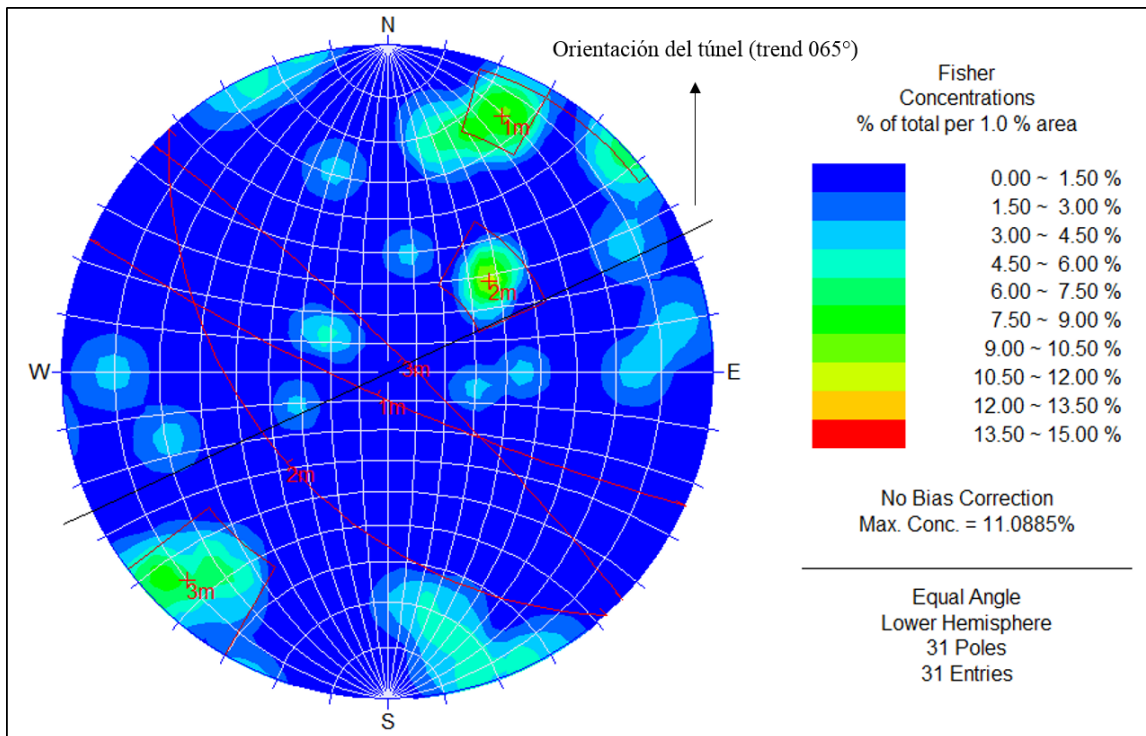


Figura 24. Distribución de las discontinuidades y sus planos respectivos de la estación CB-01.

Estación CB – 03 (veta Invasores Norte).

La figura 25 muestra dónde se concentran los datos. En esta estación hay dos grupos de datos, con concentraciones que varían de 9% a 28,46%, donde se evidencia una familia principal de diaclasas y una familia secundaria que corresponden a: 87/016 y 77/028.

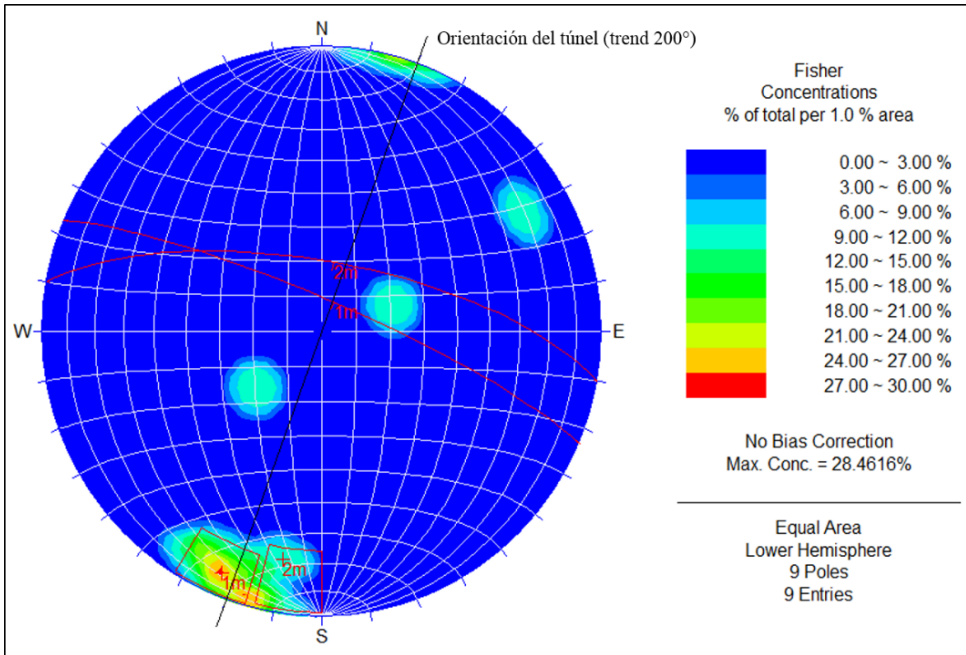


Figura 25. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-03.
Estación CB – 04 (veta Los Mellizos).

La figura 26 muestra la concentración de los datos. En esta estación hay dos grupos de datos, con concentraciones que varían de 7,5% a 21,97%, donde se evidencia una familia principal de diaclasas y el segundo grupo de datos como familia secundaria que corresponden a: 80/072 y 75/257.

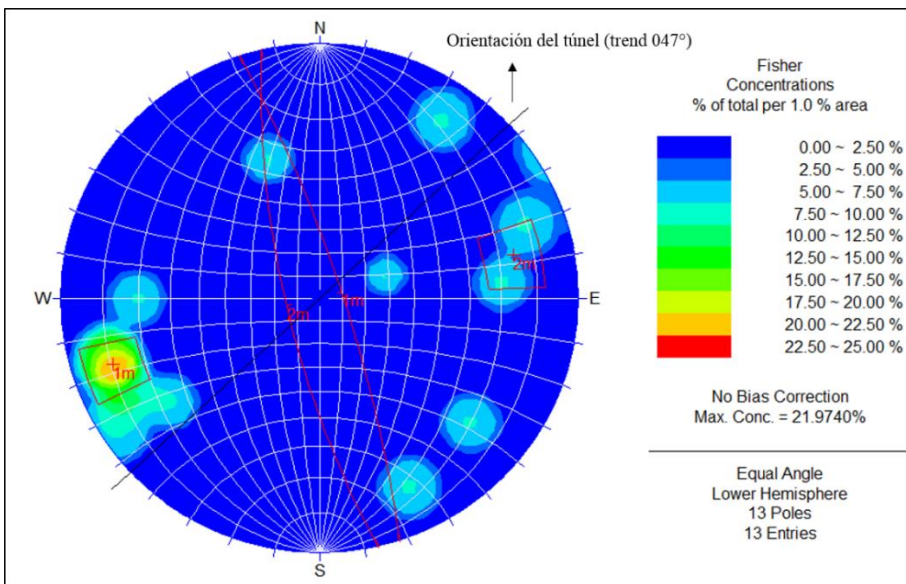


Figura 26. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-04.

Estación CB – 06 (veta Ovejo).

En esta estación se presentan cuatro grupos de datos, con concentraciones que varían de 12% a 25,59%, donde se evidencian cuatro posibles familias principales de diaclasas (Figura 27). Que corresponden a: 81/040, 72/063, 72/250 y 23/230.

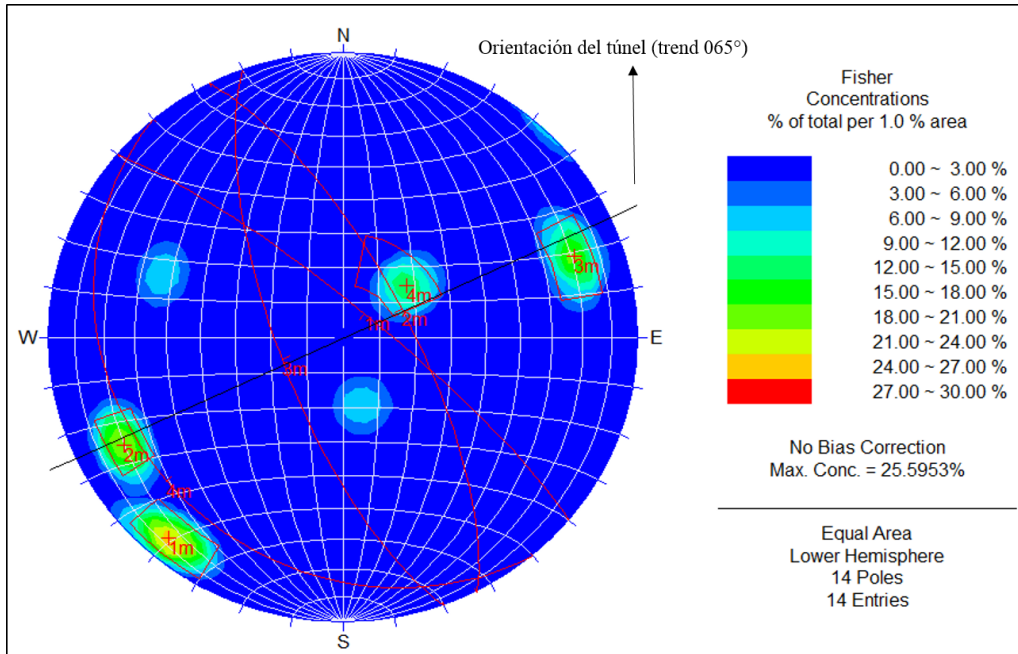


Figura 27. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-06.

Estación CB – 07 (respaldo veta 2511).

En el análisis de este tramo de la excavación se identificaron cinco agrupaciones de datos, con concentraciones que varían de 6% a 17,71%. Como resultado se establecieron cinco tendencias estructurales, las cuales representan familias principales de diaclasas y se encuentran señaladas con recuadros rojos (Figura 28). Que corresponden a: 68/052, 65/071, 40/158, 67/243 y 61/198.

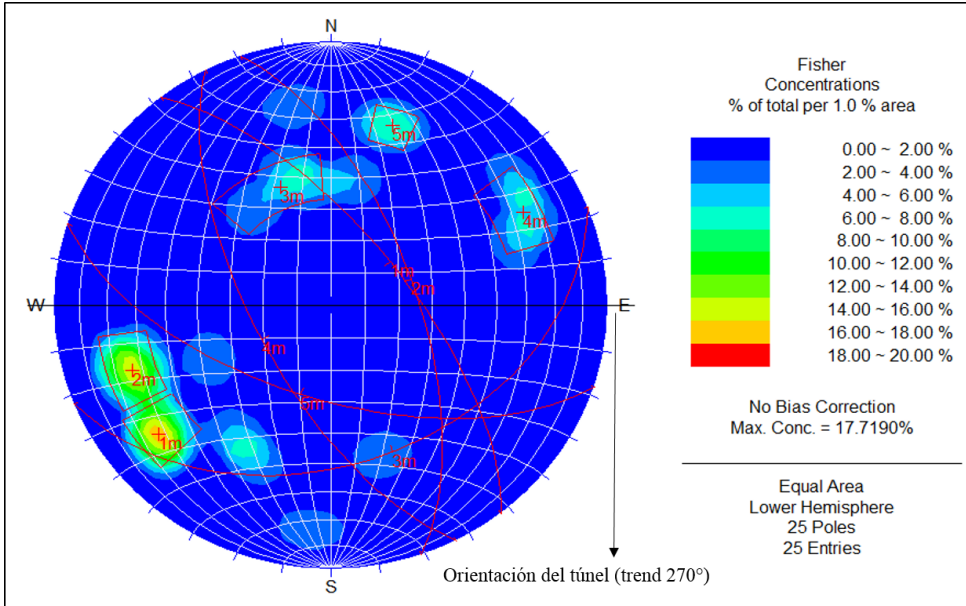


Figura 28. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-07.
Estación CB – 08 (veta 2511).

La figura 29 muestra dónde se concentran los datos. En este segmento existen cuatro grupos de datos, con concentraciones que varían de 7,5% a 11,59%, donde se evidencian cuatro posibles familias principales de diaclasas, las cuales se encuentran señaladas con un recuadro rojo y que corresponden a: 65/053, 54/354, 67/187 y 90/204.

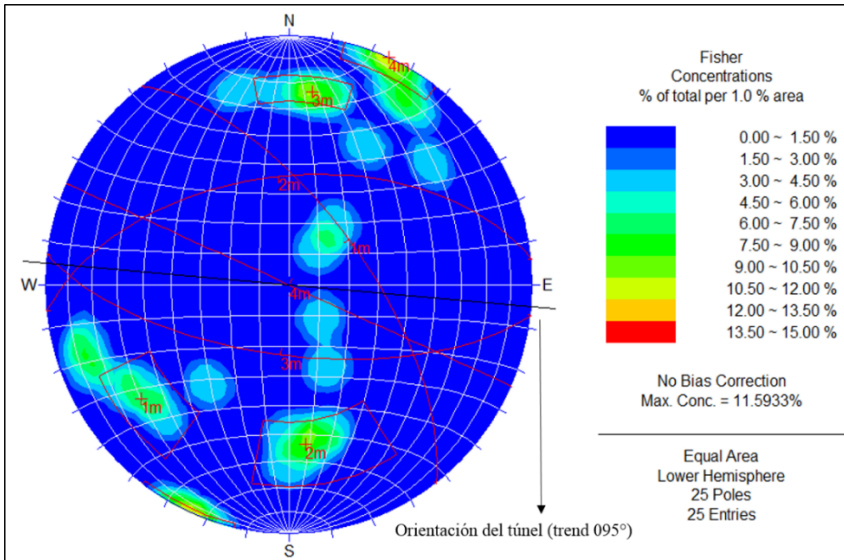


Figura 29. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-08.

Estación CB – 10 (respaldo veta Dolores).

En el análisis realizado para este tramo de la excavación se identificaron cinco agrupaciones de datos, con concentraciones que oscilan entre 6% y 14,85%, como resultado se establecieron cinco tendencias estructurales, las cuales representan familias principales de diaclasas (Figura 29). Que corresponden a: 78/347, 54/103, 59/253, 55/203 y 55/015.

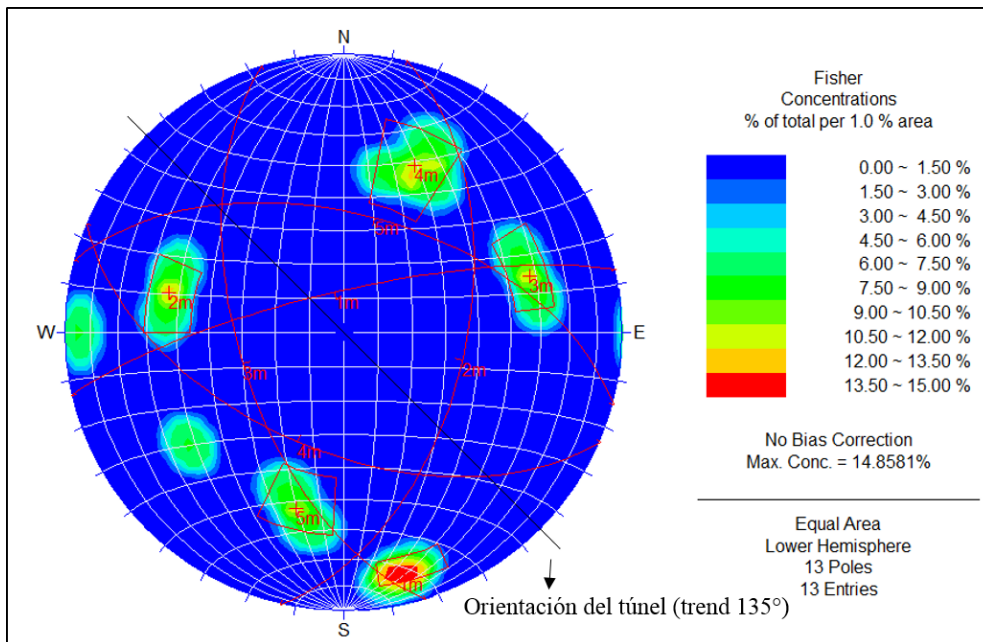


Figura 30. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos de la estación CB-10.

Estaciones de zonas mineralizadas (CB-01, CB-03, CB-04, CB-06, CB-07, CB-08, CB-10).

Para el análisis de estas estaciones se introdujeron todos los datos estructurales (en DIPS) considerados como veta. En esta figura, se muestran cuatro agrupaciones de datos con concentraciones que oscilan entre 4% - 7,12%. Dada la densidad de los datos se estimaron tres familias principales de diaclasas identificadas como 1m, 2m y 4m con dip/ dip direction de 70/250,69/063,79/034, respectivamente y una familia secundaria identificada con 3m y dato estructural 39/159.

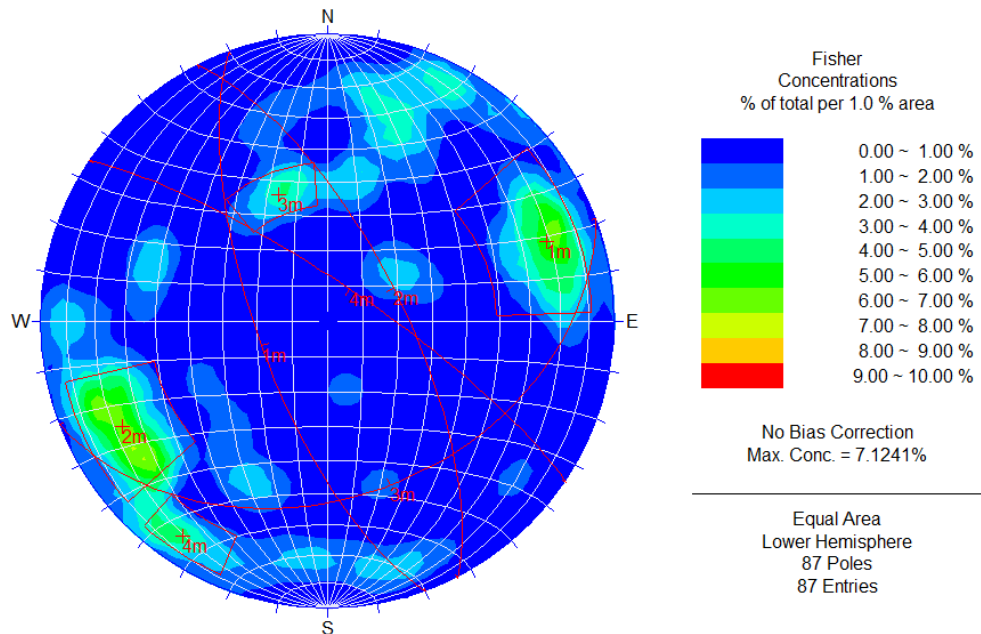


Figura 31. Principales familias de diaclasas y sus respectivos planos para la zona mineralizada.

Tabla 21. Familias principales y secundarias de diaclasas.

| Orientaciones | |
|---------------|-------------------|
| ID | Dip/dip direction |
| 1 m | 70/250 |
| 2 m | 69/063 |
| 3 m | 39/159 |
| 4 m | 79/034 |

3.2.2.2 Alteración.

La alteración en las zonas mineralizadas es mayor, ya que los fluidos hidrotermales afectan de manera directa al cuerpo de veta. Encima, encima los procesos ambientales, como el agua meteórica infiltrada por la mayor porosidad secundaria, aumentan la alteración del macizo rocoso. Estas alteraciones se traducen en la disminución de la resistencia de la roca intacta, de la cohesión y fricción entre discontinuidades y la deformabilidad de la roca. Los datos tomados arrojan en su mayoría alteraciones de *altamente meteorizada* a *ligeramente meteorizada*. Siendo, las estructuras principales las afectadas por una meteorización alta, lo que significa alta permeabilidad y una resistencia baja, en términos generales.

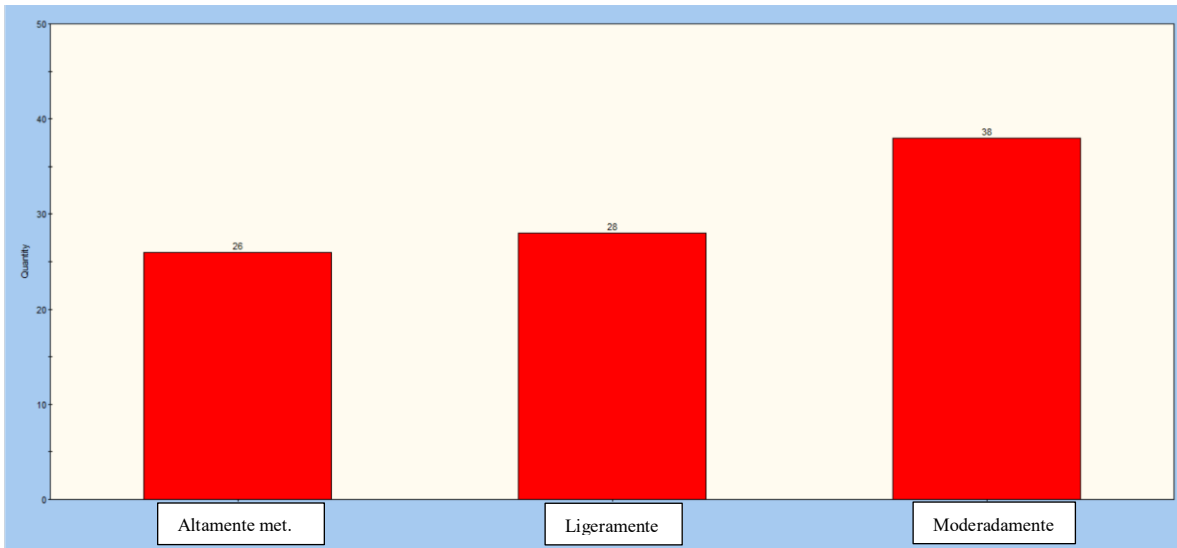


Figura 32. Histograma del parámetro alteración. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.3 Persistencia.

La persistencia hace referencia a la continuidad o extensión en tamaño de una diaclasa. Para el caso de las estructuras que forman vetas es un poco más sencillo de cuantificar y más, si se trata de las vetas encontradas en la Mina La Maruja, ya que estas estructuras tienen continuidad vertical de más de 200 metros. Las persistencias encontradas en su mayoría fueron menores a 1 m y entre 1-3 m, siendo las diaclasas, muy cercanas una de otra, lo que incrementa la probabilidad de que ocurran desprendimientos de roca. Por otro lado, se comienzan a ver persistencias de entre 3-10 m y 10-20 m, indicando persistencias de muy alta continuidad y debido a esto disminuye la estabilidad de estas zonas.

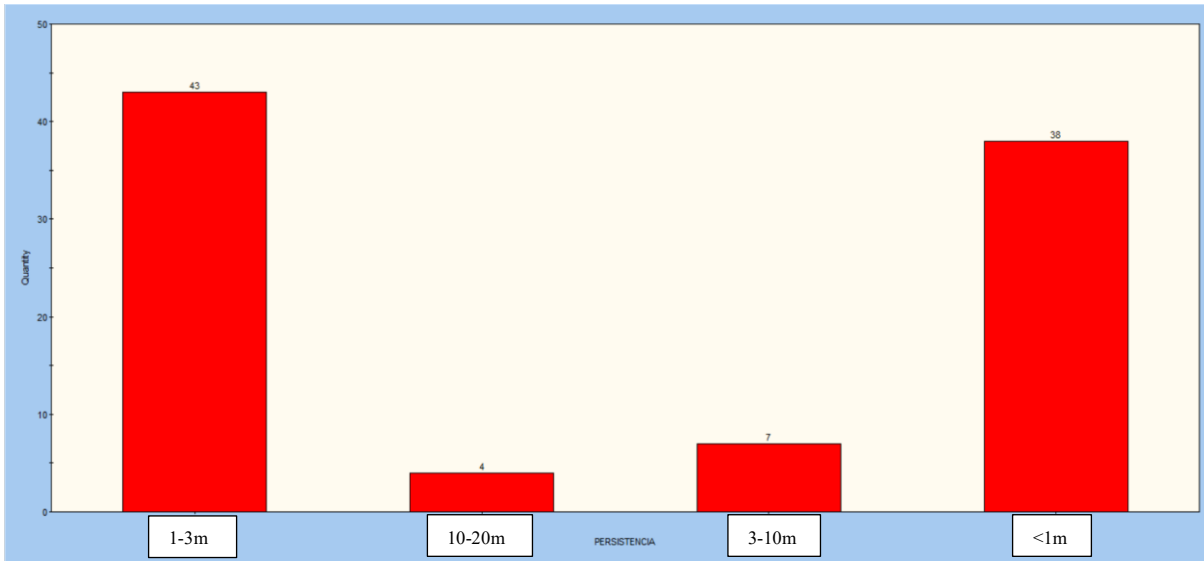


Figura 33. Histograma del parámetro persistencia. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.4 Abertura.

Este parámetro hace referencia a la separación entre las discontinuidades. Por su carácter de veta, estas tienen una mayor apertura que son rellenas por sulfuros, calcita y cuarzo. Esto se demuestra con los datos tomados y los cuales fueron representados en el histograma (Figura 33) mostrando un predominio de diaclasas con aperturas entre 1-5 mm y > 5mm. Así pues, la estabilidad del macizo rocoso es menor ya que a mayor apertura, la estabilidad y condición del macizo rocoso será menor

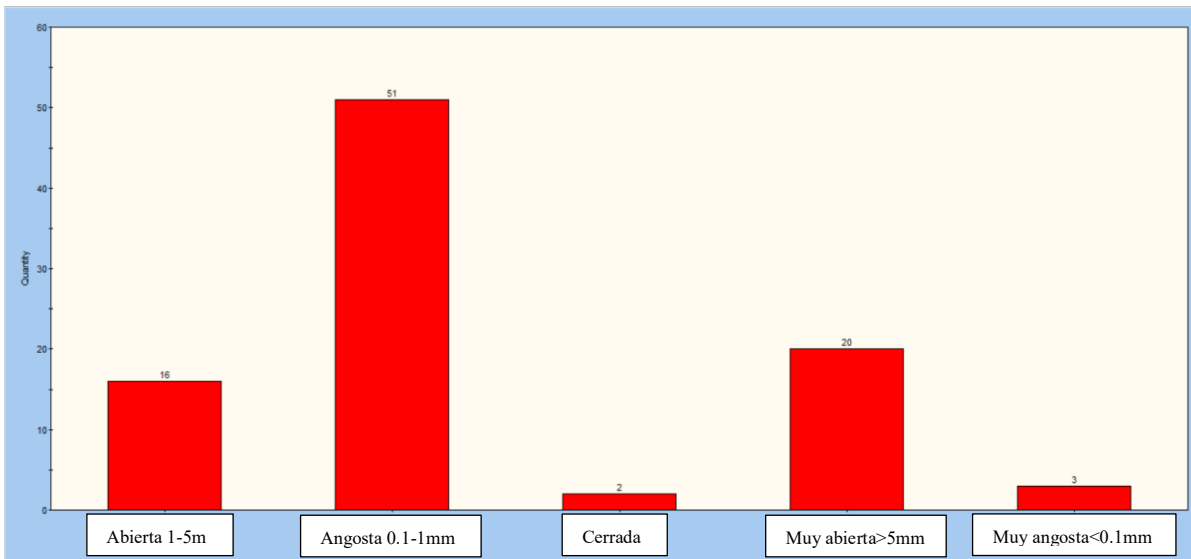


Figura 34. Histograma del parámetro apertura. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.5 Rugosidad.

La rugosidad son las ondulaciones sobre la superficie de la discontinuidad, estas irregularidades tienen gran influencia en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y en el factor de seguridad de las cuñas ya que pueden controlar las posibles direcciones de movimiento. Las zonas mineralizadas son menos competentes en relación con la roca caja, ya que la mayoría de las discontinuidades están entre *rugosas* y *ligeramente rugosas*. Dado lo anterior, las cuñas formadas se moverán con mayor facilidad, lo que implica su posible desprendimiento.

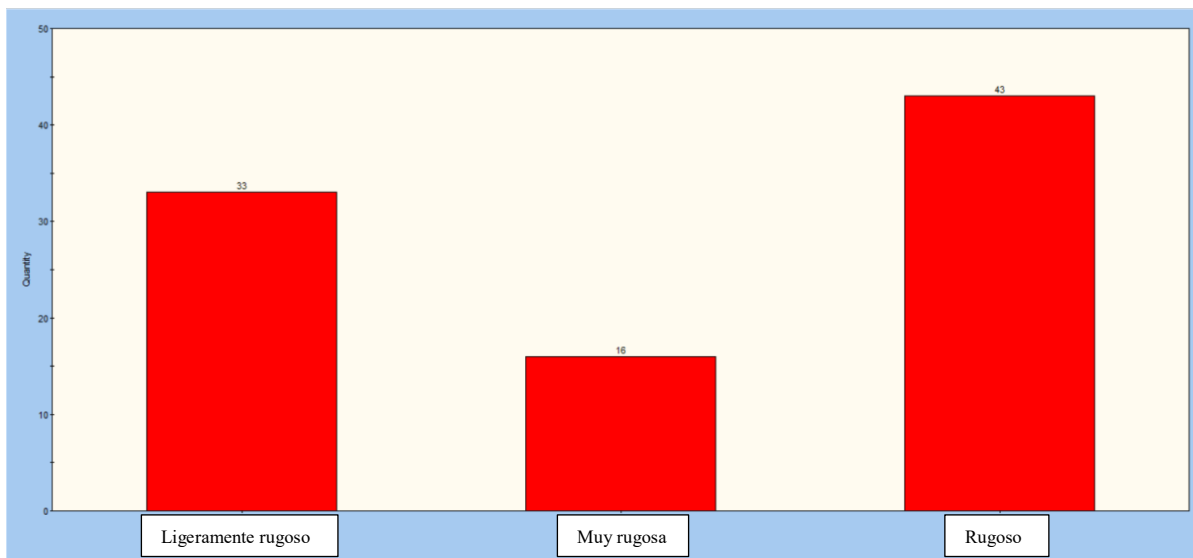


Figura 35. Histograma del parámetro rugosidad. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.6 Relleno.

El relleno está en cierta medida relacionado con la apertura ya que corresponde a los materiales que se alojan en los espacios de las discontinuidades. En este depósito, los rellenos que contiene las vetas son sulfuros, calcita y cuarzo.

Predominan el relleno blando (>5mm) y relleno duro (<5mm) correspondientes a las venas y venillas.

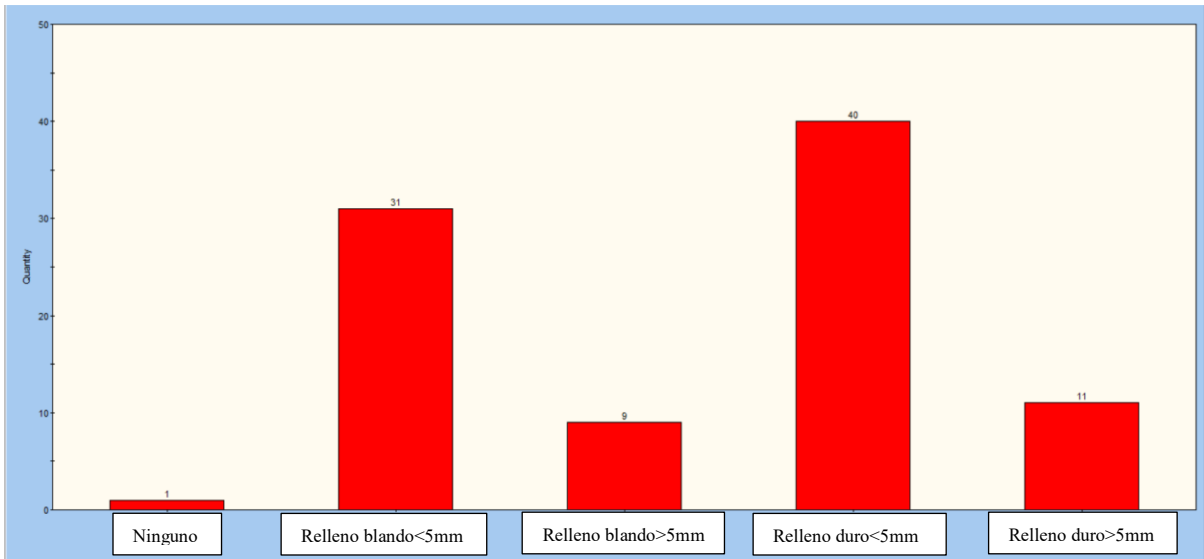


Figura 36. Histograma del parámetro relleno. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.7 Comportamiento del agua.

La permeabilidad secundaria es la responsable de que el agua fluya entre las discontinuidades, lo que trae consecuencias directas en la alteración de la roca y los minerales dentro de la veta, incluso en la resistencia al corte. Para las discontinuidades de veta la mayor parte de las diaclasas se encuentran entre *húmedas* y *goteo*, lo cual altera intensamente la roca, disminuyendo la competencia de ésta debido a la formación de arcillas.

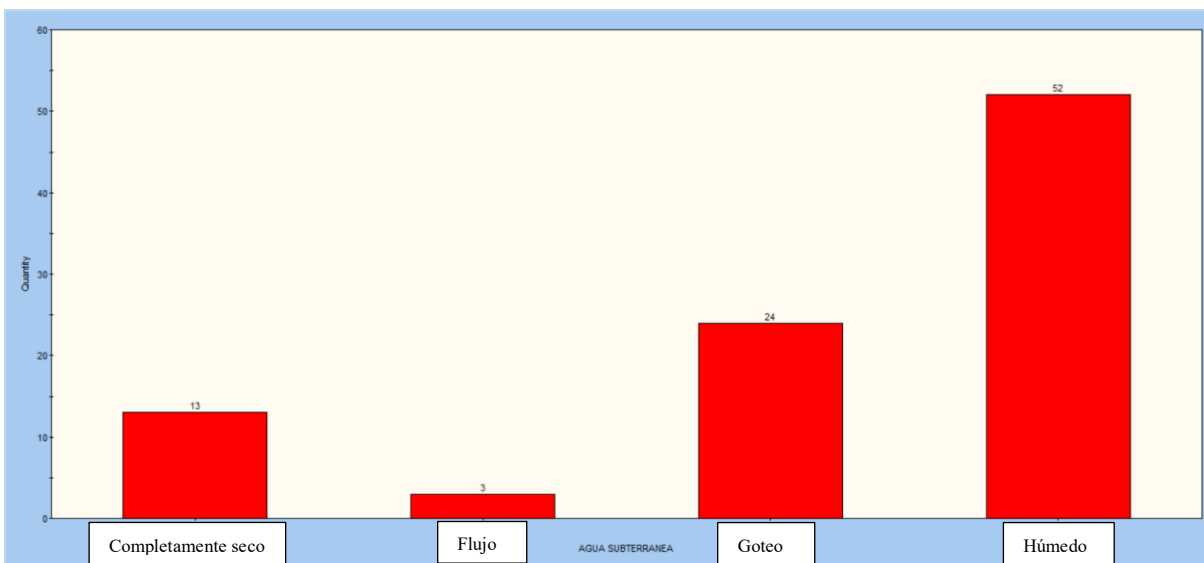


Figura 37. Histograma del parámetro comportamiento del agua. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Clasificación del macizo rocoso.

Se muestra el mapa de la clasificación del macizo rocoso realizada por medio de la metodología RMR de Bieniawski (1989) y Q de Barton et al. (1974) de las estaciones realizadas durante la etapa de campo en el nivel veintiuno de la mina La Maruja.

Las zonas del mapa que no se encuentran clasificadas dentro de la cruzada principal, se debe a la ejecución de operaciones mineras en el momento en que se realizó el levantamiento de las discontinuidades en dicha zona. La razón por la cual las demás zonas no se encuentran clasificadas es porque Gran Colombia Gold Marmato nos proporcionó el mapa más actualizado del nivel veintiuno de la mina, el cual no se encontraba desarrollado a ese punto en el momento en que se realizó la etapa de campo.

A continuación, se muestran las tablas directrices para el uso de soporte en la excavación para cada uno de los sistemas de clasificación utilizados en este trabajo. De acuerdo con el sistema RMR, Unal (1983) propuso un enfoque integrado para la evaluación de la estabilidad teniendo en cuenta la presión, el tiempo y la deformación (citado en Bieniawski, 1989, p 65). Esto se presenta en la Tabla 22.

Para el Sistema Q, además de la calidad del macizo rocoso (valor Q) debe tenerse en cuenta el factor *Excavation Support Ratio* (ESR) ver Tabla 23. Adicionalmente, para determinar el soporte debe utilizarse el ábaco que correlaciona la calidad del macizo rocoso con el soporte (ver Figura 38 y 39).

Tabla 22. Directrices para el uso de soporte de acuerdo con el sistema RMR.

| Clasificación del Macizo Rocoso | Excavación | Pernos de roca (20 mm diám. totalmente cementados) | Concreto lanzado | Cerchas de acero |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Roca muy buena RMR: 81-100 | A frente completo, avance de 3 m. | Generalmente no se requiere sostenimiento, excepto ocasionalmente pernos de roca | | |
| II. Roca buena RMR: 61-80 | A frente completo, avance de 1.0 a 1.5 m. Instalar el sostenimiento a 20 m del frente. | Localmente, pernos de 3 m de long. instalados en el techo, espaciados 2.5 m, ocasionalmente con malla metálica | 50 mm en el techo, donde se requiera | No |
| III. Roca regular RMR: 41-60 | Excavación superior y banqueo, avance superior de 1.0 a 1.5 m en el techo. Iniciar el sostenimiento después de cada voladura. Culminar el sostenimiento a 10 m del frente | Pernos sistemáticos de 4 m de long., espaciamiento 1.5- 2 m en el techo y paredes con malla metálica en el techo. | 50-100 mm en el techo y 30 mm en las paredes | No |
| IV. Roca mala RMR: 21-40 | Excavación superior y banqueo, avance de 0.5 a 1.5 m en el techo. Instalación de sostenimiento junto con la excavación, a 10 m del frente | Pernos sistemáticos de 4-5 m de long., espac. 1-1.5 m en el techo y paredes con malla metálica, | 100-150 mm en el techo y 100 mm en las paredes | Cerchas ligeras espac. 1.5 m donde se requiera. |
| V. Roca muy pobre RMR: <20 | Galerías múltiples de avance superior de 0.5 a 1.5 m. Instalar sostenimiento junto con la excavación. Aplicación de shotcrete lo más pronto posible después de la voladura. | Pernos sistemáticos 5-6 m de long., espaciado de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla metálica. | 150-200 mm en el techo, 150 mm en las paredes y 50 mm en el frente. | Cerchas medias a pesadas espaciadas 0.75 m con revestimiento de acero y estacas de avance, de ser necesario. |

Fuente: Tomada y modificada de Bieniawski (1989, p. 55).

Tabla 23. Valor ESR.

| 7 Type of excavation | | ESR |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| A | Temporary mine openings, etc. | ca. 3-5 |
| B | Vertical shafts*: i) circular sections ii) rectangular/square section * Dependant of purpose. May be lower than given values. | ca. 2.5 ca. 2.0 |
| C | Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (exclude high pressure penstocks), water supply tunnels, pilot tunnels, drifts and headings for large openings. | 1.6 |
| D | Minor road and railway tunnels, surge chambers, access tunnels, sewage tunnels, etc. | 1.3 |
| E | Power houses, storage rooms, water treatment plants, major road and railway tunnels, civil defence chambers, portals, intersections, etc. | 1.0 |
| F | Underground nuclear power stations, railways stations, sports and public facilities, factories, etc. | 0.8 |
| G | Very important caverns and underground openings with a long lifetime, ≈ 100 years, or without access for maintenance. | 0.5 |

Fuente: NGI (2015, p. 33).

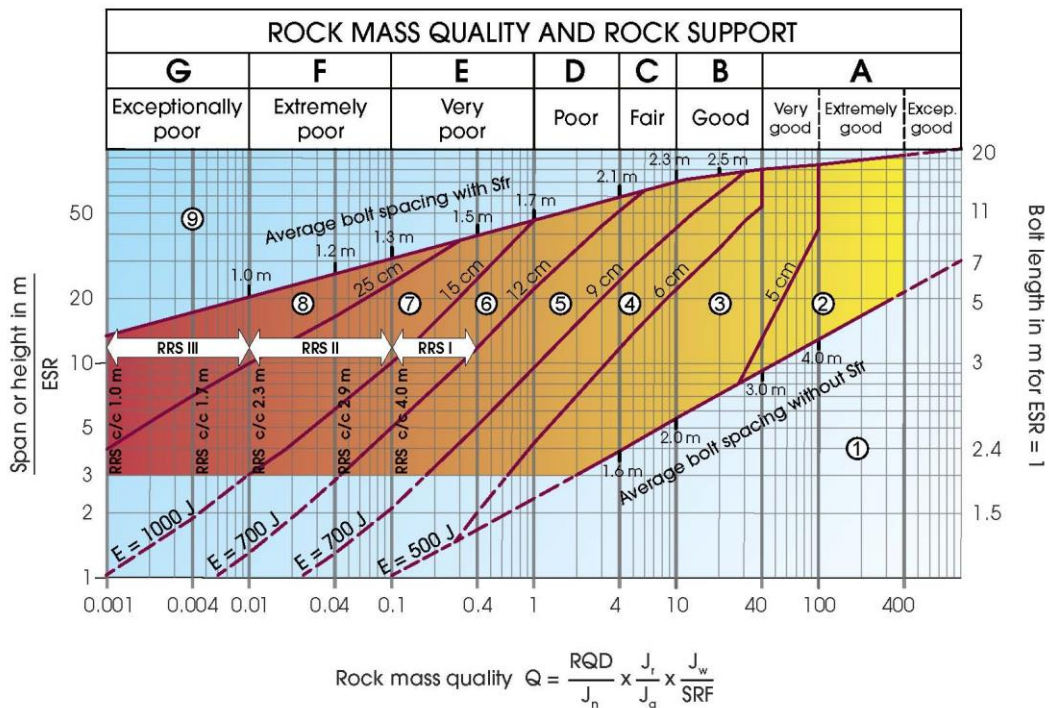


Figura 38. Ábaco calidad del macizo rocoso y soporte de roca. Fuente: NGI (2015, p. 34).

Support categories

- ① Unsupported or spot bolting
- ② Spot bolting, **SB**
- ③ Systematic bolting, fibre reinforced sprayed concrete, 5-6 cm, **B+Sfr**
- ④ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
- ⑤ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700)+B**
- ⑥ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 12-15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E700)+RRS I+B**
- ⑦ Fibre reinforced sprayed concrete >15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
- ⑧ Cast concrete lining, **CCA** or **Sfr (E1000)+RRS III+B**
- ⑨ Special evaluation

Bolts spacing is mainly based on $\varnothing 20$ mm



E = Energy absorption in fibre reinforced sprayed concrete

ESR = Excavation Support Ratio

Areas with dashed lines have no empirical data

Figura 39. Fuente: NGI (2015, p. 34).

RRS - spacing related to Q-value

-  **Si30/6 $\varnothing 16 - \varnothing 20$ (span 10m)**
D40/6+2 $\varnothing 16-20$ (span 20m)
-  **Si35/6 $\varnothing 16-20$ (span 5m)**
D45/6+2 $\varnothing 16-20$ (span 10m)
D55/6+4 $\varnothing 20$ (span 20m)
-  **D40/6+4 $\varnothing 16-20$ (span 5 m)**
D55/6+4 $\varnothing 20$ (span 10 m)
Special evaluation (span 20 m)

Si30/6 = Single layer of 6 rebars,
30 cm thickness of sprayed concrete

D = Double layer of rebars

$\varnothing 16$ = Rebar diameter is 16 mm

c/c = RRS spacing, centre - centre

3.3.1 Roca encajante.

3.3.1.1 Variaciones en el RMR.

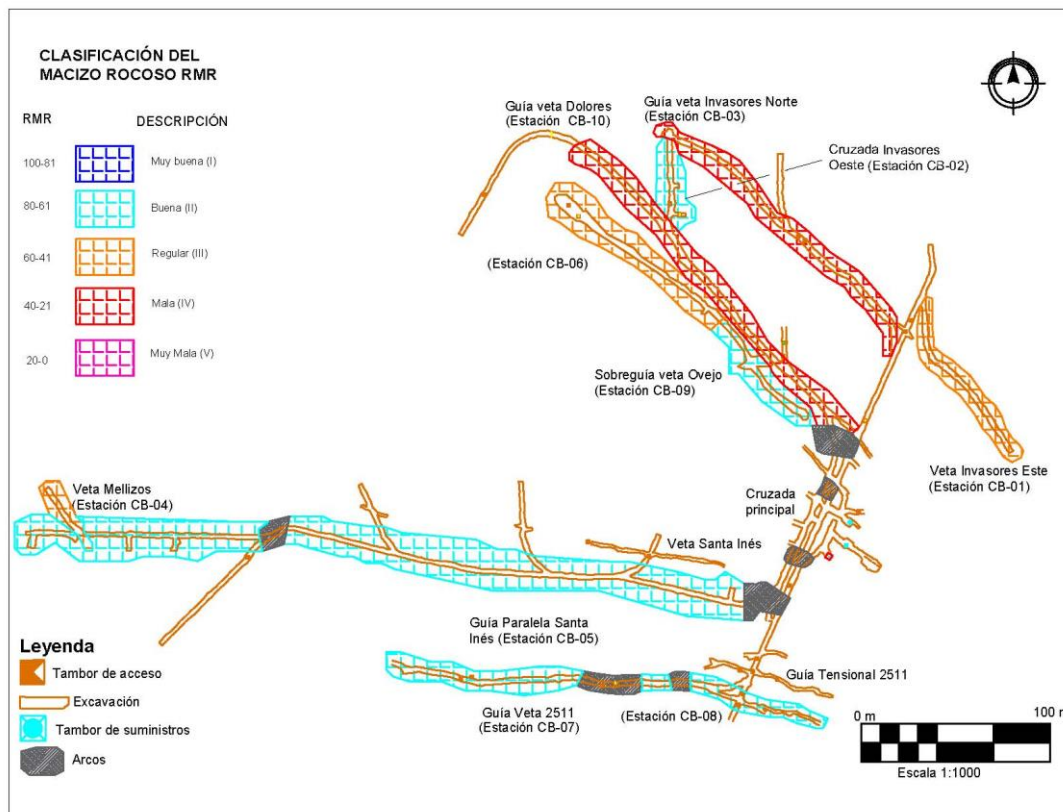


Figura 40. Mapeo geomecánico del sistema de clasificación RMR. Fuente: Elaboración propia por medio del software AutoCAD.

Tabla 24. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 02

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|----|-----|------------------------------------|--------------|----------|-----------|---------|------------|-------|------------------|------------------------------|-----|---------------|
| Z | Tipo de Discontinuidad | D _r (Dicienas, V, Ven) | DIP (GRUAMENTO) | DIP DIR(AZIMUT) | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR | RMR CORREGIDO |
| | | | | | sc | | RQD | Espaciamiento entre Discontinuidad | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Alteración | | | | | |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | D | 335 | 68 | 12 | 20 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | | | |
| 2 | D | 013 | 88 | 7 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 69 | 64 | | | |
| 3 | D | 000 | 76 | 12 | 20 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | | | |
| 4 | D | 180 | 84 | 15 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 6 | 5 | 10 | 5 | 81 | 76 | | | |
| 5 | D | 005 | 70 | 12 | 20 | 8 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 74 | 69 | | | |
| 6 | D | 020 | 89 | 12 | 20 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | | | |
| 7 | D | 020 | 89 | 12 | 20 | 8 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 72 | 67 | | | |
| 8 | D | 330 | 72 | 12 | 20 | 10 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 10 | 5 | 80 | 75 | | | |
| 9 | D | 020 | 89 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 6 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | | | |
| 10 | D | 015 | 88 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 74 | 69 | | | |
| 11 | D | 037 | 80 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | | | |
| 12 | D | 039 | 60 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 74 | 69 | | | |
| 13 | D | 309 | 82 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 10 | 5 | 70 | 65 | | | |
| 14 | D | 310 | 74 | 15 | 20 | 8 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 10 | 5 | 71 | 66 | | | |
| 15 | D | 160 | 20 | 7 | 20 | 15 | 2 | 2 | 5 | 2 | 3 | 10 | 5 | 68 | 63 | | | |
| 16 | D | 240 | 69 | 12 | 20 | 15 | 6 | 6 | 6 | 2 | 5 | 10 | 5 | 82 | 77 | | | |
| 17 | D | 038 | 89 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 6 | 2 | 1 | 4 | 5 | 65 | 60 | | | |
| 18 | D | 65 | 88 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 2 | 1 | 10 | 5 | 70 | 65 | | | |
| 19 | D | 180 | 80 | 12 | 20 | 15 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 10 | 5 | 77 | 72 | | | |
| 20 | D | 205 | 79 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | | | |
| 21 | D | 180 | 20 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | | | |
| 22 | D | 300 | 70 | 7 | 20 | 10 | 4 | 4 | 6 | 4 | 3 | 10 | 5 | 68 | 63 | | | |
| 23 | D | 25 | 86 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | | | |
| 24 | D | 220 | 81 | 12 | 20 | 10 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 76 | 71 | | | |
| 25 | D | 215 | 32 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 74 | 69 | | | |
| 26 | D | 195 | 45 | 12 | 20 | 10 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 76 | 71 | | | |
| 27 | D | 25 | 85 | 12 | 20 | 10 | 4 | 2 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 70 | 65 | | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | 68 | | | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | II | | | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | BUENA | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 05

| MAPEO GEOMECANICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-------------|-----|---------------------|-------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------------|-----|---------------|
| Z | Tipo de Discontinuidad | Dip (BUZAMIENTO) | DIP DIR (AZIMUT) | sc | | RQD | Espaciamiento entre | | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR | RMR CORREGIDO |
| | | | | Resistencia a la Compresión | | | Discontinuidad | | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Alteración | | | | |
| | | | | 15 | 2 | | 20 | 5 | | | | | | | | | |
| | | | | 1.- >250 Mpa | 1.- 90-100% | 20 | 1.- <2 m | 1.- << 1m | 1.- Cerrada 0 | 1.- Muy rugoso | 1.- Ninguna | 1.- No meteorizada | 1.- Completamente seco | 1.- Muy favorable | | | |
| | | | | 2.- 100-250 Mpa | 2.- 75-90% | 17 | 2.- 2-10 m | 2.- 1-3 m | 2.- Muy rugosa <0.1 mm | 2.- Rugoso | 2.- Relleno duro <5mm | 2.- Ligera | 2.- Húmedo | 2.- Favorable | | | |
| | | | | 3.- 50-100 Mpa | 3.- 50-75% | 13 | 3.- 10-20 m | 3.- 3-10 m | 3.- Abierta 0.1 - 1.0 mm | 3.- Ligera y rugosa | 3.- Relleno duro >5mm | 3.- Moderadamente meteorizada | 3.- Mojado | 3.- Regular | | | |
| | | | | 4.- 25-50 Mpa | 4.- 25-50% | 8 | 4.- 60-200 mm | 4.- 10-20 m | 4.- Abierta 1.0 - 5.0 mm | 4.- Muy rugosa | 4.- Relleno blando <5mm | 4.- Altamente meteorizada | 4.- Gotoso | 4.- Desfavorable | | | |
| | | | | 5.- <25 Mpa | 5.- <25% | 3 | 5.- >200 mm | 5.- >20 m | 5.- Muy abierta > 5.0 mm | 5.- Muy lisa | 5.- Relleno blando >5mm | 5.- Descompuesta | 5.- Flujo | 5.- Muy desfavorable | | | |
| 1 | V | 170 | 70 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | |
| 2 | V | 007 | 52 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 15 | 5 | 81 | 76 | |
| 3 | V | 017 | 52 | 12 | 20 | 8 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 15 | 5 | 79 | 74 | |
| 4 | V | 190 | 88 | 12 | 20 | 8 | 8 | 4 | 1 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 67 | 62 | |
| 5 | V | 004 | 70 | 12 | 20 | 8 | 8 | 4 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 73 | 68 | |
| 6 | V | 060 | 69 | 12 | 20 | 15 | 15 | 4 | 6 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 81 | 76 | |
| 7 | V | 185 | 67 | 12 | 20 | 15 | 15 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 15 | 5 | 84 | 79 | |
| 8 | V | 050 | 72 | 12 | 20 | 15 | 15 | 4 | 1 | 5 | 4 | 3 | 15 | 5 | 79 | 74 | |
| 9 | V | 068 | 50 | 12 | 20 | 15 | 15 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | |
| 10 | V | 140 | 60 | 12 | 20 | 15 | 15 | 6 | 1 | 6 | 4 | 3 | 10 | 5 | 77 | 72 | |
| 11 | V | 164 | 60 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | |
| 12 | V | 142 | 60 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 77 | 72 | |
| 13 | V | 352 | 69 | 12 | 20 | 8 | 8 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 72 | 67 | |
| 14 | V | 276 | 76 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 73 | 68 | |
| 15 | V | 214 | 60 | 12 | 20 | 15 | 15 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | |
| 16 | V | 065 | 80 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 77 | 72 | |
| 17 | V | 165 | 79 | 12 | 20 | 5 | 5 | 4 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 70 | 65 | |
| 18 | V | 160 | 66 | 12 | 20 | 8 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | |
| 19 | V | 165 | 84 | 12 | 20 | 8 | 8 | 4 | 1 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 70 | 65 | |
| 20 | V | 143 | 80 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | |
| 21 | V | 180 | 60 | 12 | 20 | 10 | 10 | 4 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 71 | 66 | |
| 22 | V | 215 | 60 | 12 | 20 | 8 | 8 | 4 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 69 | 64 | |
| 23 | V | 130 | 68 | 12 | 20 | 10 | 10 | 6 | 1 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | |
| 24 | V | 215 | 86 | 12 | 20 | 8 | 8 | 6 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 75 | 70 | |
| 25 | V | 214 | 80 | 12 | 20 | 8 | 8 | 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 71 | 66 | |
| 26 | V | 150 | 60 | 12 | 20 | 10 | 10 | 4 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 71 | 66 | |
| 27 | V | 240 | 80 | 12 | 20 | 10 | 10 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 72 | 67 | |
| 28 | V | 145 | 60 | 12 | 20 | 10 | 10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | |
| 29 | V | 222 | 84 | 7 | 20 | 8 | 8 | 4 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 64 | 59 | |
| 30 | V | 227 | 68 | 12 | 20 | 8 | 8 | 4 | 1 | 6 | 4 | 5 | 15 | 5 | 75 | 70 | |
| 31 | V | 155 | 62 | 12 | 20 | 10 | 10 | 4 | 1 | 5 | 4 | 5 | 15 | 5 | 76 | 71 | |
| 32 | V | 46 | 78 | 12 | 20 | 15 | 15 | 4 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | |
| 33 | V | 335 | 80 | 12 | 20 | 15 | 15 | 4 | 1 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | 69 | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | | II | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | BUENA | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 09

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|------------------|-----------------------------|----|-----|------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---------|-----------|------------------|------------------------------|------------|---------------|
| N° | Tipo de Discontinuidad | D: Dirección, V: Veta | DIP (BUZAMIENTO) | DIP/DIR (AZIMUT) | sc | | RQD | Espaciamiento entre Discontinuidad | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR BÁSICO | RMR CORREGIDO |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Ateración | | | | |
| | | | | | 15 | 2 | | | | | | | | | | | |
| 1 | D | 84 | 056 | | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 15 | 5 | 77 | 72 | |
| 2 | D | 60 | 196 | | 12 | 20 | 10 | 4 | 1 | 6 | 1 | 3 | 15 | 5 | 72 | 67 | |
| 3 | D | 86 | 130 | | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 6 | 4 | 3 | 15 | 5 | 80 | 75 | |
| 4 | D | 86 | 225 | | 12 | 20 | 10 | 4 | 1 | 6 | 1 | 3 | 15 | 5 | 72 | 67 | |
| 5 | D | 30 | 010 | | 12 | 20 | 8 | 6 | 4 | 3 | 4 | 1 | 15 | 5 | 73 | 68 | |
| 6 | D | 60 | 190 | | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 15 | 5 | 77 | 72 | |
| 7 | D | 84 | 073 | | 12 | 20 | 10 | 6 | 5 | 3 | 4 | 1 | 15 | 5 | 76 | 71 | |
| 8 | D | 53 | 180 | | 7 | 20 | 10 | 4 | 4 | 6 | 4 | 1 | 15 | 5 | 71 | 66 | |
| 9 | D | 80 | 055 | | 7 | 20 | 10 | 2 | 0 | 3 | 0 | 1 | 15 | 5 | 58 | 53 | |
| 10 | D | 80 | 264 | | 12 | 17 | 8 | 4 | 5 | 3 | 4 | 1 | 15 | 5 | 69 | 64 | |
| 11 | D | 80 | 133 | | 7 | 17 | 10 | 4 | 5 | 3 | 4 | 1 | 15 | 5 | 66 | 61 | |
| 12 | D | 60 | 190 | | 12 | 17 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 15 | 5 | 72 | 67 | |
| 13 | D | 30 | 010 | | 12 | 17 | 5 | 6 | 4 | 3 | 4 | 1 | 15 | 5 | 67 | 62 | |
| 14 | D | 20 | 080 | | 12 | 17 | 8 | 6 | 4 | 3 | 4 | 1 | 15 | 5 | 70 | 65 | |
| 15 | D | 68 | 005 | | 7 | 17 | 8 | 6 | 4 | 3 | 4 | 1 | 15 | 5 | 65 | 60 | |
| 16 | D | 16 | 185 | | 12 | 17 | 8 | 6 | 5 | 5 | 4 | 1 | 15 | 5 | 73 | 68 | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | 66 | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | | II | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | BUENA | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2 Variaciones en el Q.

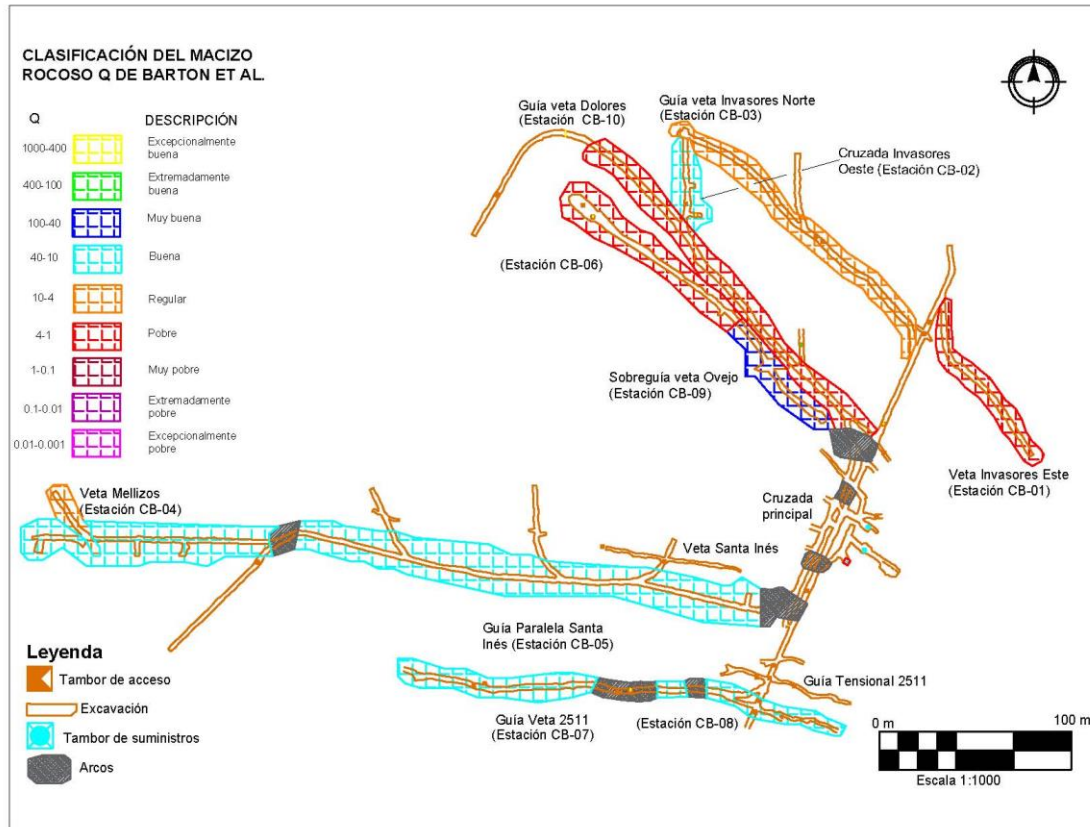


Figura 41. Mapeo geomecánico de la clasificación Q. Fuente: Elaboración propia por medio del software AutoCAD.

A continuación, se muestra la clasificación obtenida por el sistema de clasificación Q (Barton et al.) para cada una de las estaciones realizadas en roca encajante:

Tabla 27. Clasificación por el método Q (estación CB-02)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 100 |
| Número de discontinuidades | J_n | 9 |
| Número de rugosidad | J_r | 3 |
| Número de alteración | J_a | 1 |
| Número de agua subterránea | J_w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 1 |
| Q = (RQD/J_n) x (J_r / J_a) x (J_w/ SRF) | | Q |
| CLASIFICACIÓN Q | | Buena |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Clasificación por el método Q (estación CB-05)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 100 |
| Número de discontinuidades | J_n | 9 |
| Número de rugosidad | J_r | 3 |
| Número de alteración | J_a | 1 |
| Número de agua subterránea | J_w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 1 |
| Q = (RQD/J_n) x (J_r / J_a) x (J_w/ SRF) | | Q |
| CLASIFICACIÓN Q | | Buena |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Clasificación por el método Q (estación CB-09)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-------------------------------------------------------|----------------|-------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 100 |
| Número de discontinuidades | J _n | 4 |
| Número de rugosidad | J _r | 3 |
| Número de alteración | J _a | 1 |
| Número de agua subterránea | J _w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 2,5 |
| $Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$ | Q | 30,00 |
| CLASIFICACIÓN Q | | Buena |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Zonas mineralizadas.

3.3.2.1 Variaciones en el RMR.

Tabla 30. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 01

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-----|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------------------|------------|---------------|
| N | Tipo de Discontinuidad | Dip (GRUZAMIENTO) | DIP (GRUZAMIENTO) | sc | RQD | Espaciamiento entre Discontinuidad | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR BÁSICO | RMR CORREGIDO |
| | | | | Resistencia a la Compresión | | | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Alteración | | | | |
| | | | | 15 12 10 7 4 3 | | | 20 17 13 8 3 | 20 15 10 8 5 | 6 4 2 1 0 | 6 4 1 1 0 | 6 4 2 1 0 | | | | |
| 1 | V | 74 | 270 | 4 | 20 | 8 | 2 | 0 | 5 | 2 | 1 | 4 | 5 | 46 | 41 |
| 2 | V | 80 | 090 | 4 | 20 | 5 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 10 | 5 | 59 | 54 |
| 3 | V | 79 | 242 | 4 | 20 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 10 | 5 | 62 | 57 |
| 4 | V | 79 | 205 | 4 | 20 | 10 | 6 | 0 | 5 | 2 | 1 | 10 | 5 | 58 | 53 |
| 5 | V | 70 | 195 | 7 | 20 | 10 | 4 | 0 | 5 | 2 | 1 | 10 | 5 | 59 | 54 |
| 6 | V | 86 | 205 | 7 | 20 | 10 | 4 | 1 | 5 | 2 | 1 | 10 | 5 | 65 | 60 |
| 7 | V | 74 | 190 | 7 | 20 | 8 | 2 | 0 | 5 | 2 | 1 | 10 | 5 | 60 | 55 |
| 8 | V | 79 | 203 | 4 | 20 | 10 | 6 | 1 | 5 | 2 | 1 | 10 | 5 | 64 | 59 |
| 9 | V | 70 | 356 | 4 | 20 | 15 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 15 | 5 | 79 | 74 |
| 10 | V | 40 | 190 | 4 | 20 | 15 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 15 | 5 | 79 | 74 |
| 11 | V | 84 | 260 | 4 | 20 | 15 | 6 | 4 | 5 | 4 | 1 | 10 | 5 | 74 | 69 |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | 59,1 | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | III | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | REGULAR | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 03

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------------------------|----|-----|------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---------|-----------|------------------|---------------|------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|-----|-----|
| Z | Tipo de discontinuidad | D: Dirección, V: Veta | DIP (BUZAMIENTO) | DIPDIR (AZIMUT) | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | | | | | | RMR CORREGIDO | | | | | | | | | | |
| | | | | | sc | | RQD | Espaciamiento entre discontinuidad | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | | Orientación Discontinuidades | | | | | | | | | |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Ateración | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 20 | 15 | 10 | 5 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 15 | 10 | 7 | 5 | 4 | 0 | 0 | 2 | -10 | -12 |
| 1 | veta | 018 | 82 | 4 | 8 | 8 | 8 | 4 | 1 | 3 | 1 | 3 | 4 | 5 | 36 | 31 | | | | | | | | | |
| 2 | veta | 010 | 70 | 7 | 8 | 6 | 4 | 1 | 5 | 1 | 3 | 10 | 5 | 45 | 40 | | | | | | | | | | |
| 3 | veta | 025 | 74 | 7 | 8 | 8 | 4 | 1 | 5 | 1 | 3 | 10 | 5 | 47 | 42 | | | | | | | | | | |
| 4 | veta | 240 | 72 | 7 | 8 | 8 | 4 | 1 | 3 | 1 | 3 | 10 | 5 | 45 | 40 | | | | | | | | | | |
| 5 | veta | 030 | 80 | 7 | 8 | 8 | 4 | 1 | 3 | 1 | 3 | 10 | 5 | 45 | 40 | | | | | | | | | | |
| 6 | veta | 020 | 89 | 2 | 3 | 5 | 6 | 1 | 3 | 1 | 3 | 10 | 5 | 34 | 29 | | | | | | | | | | |
| 7 | veta | 010 | 89 | 2 | 3 | 5 | 6 | 1 | 3 | 1 | 3 | 10 | 5 | 34 | 29 | | | | | | | | | | |
| 8 | veta | 250 | 22 | 2 | 3 | 5 | 4 | 1 | 3 | 1 | 3 | 10 | 5 | 32 | 27 | | | | | | | | | | |
| 9 | veta | 050 | 25 | 2 | 3 | 5 | 4 | 1 | 3 | 1 | 3 | 10 | 5 | 32 | 27 | | | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | 34 | | | | | | | | | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | | IV | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | MALA | | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 04

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------------------------|----|-----|------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---------|-----------|------------------|---------------|------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|-----|-----|
| Z | Tipo de discontinuidad | D: Dirección, F: Veta | DIP (BUZAMIENTO) | DIPDIR (AZIMUT) | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | | | | | | RMR CORREGIDO | | | | | | | | | | |
| | | | | | sc | | RQD | Espaciamiento entre discontinuidad | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | | Orientación Discontinuidades | | | | | | | | | |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Ateración | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 20 | 15 | 10 | 5 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 15 | 10 | 7 | 5 | 4 | 0 | 0 | 2 | -10 | -12 |
| 1 | D | 055 | 70 | 7 | 20 | 8 | 4 | 5 | 5 | 6 | 5 | 4 | 5 | 64 | 59 | | | | | | | | | | |
| 2 | V | 160 | 60 | 7 | 20 | 8 | 6 | 5 | 5 | 1 | 1 | 4 | 5 | 57 | 52 | | | | | | | | | | |
| 3 | V | 057 | 86 | 7 | 20 | 10 | 2 | 5 | 5 | 1 | 1 | 4 | 5 | 55 | 50 | | | | | | | | | | |
| 4 | V | 074 | 80 | 7 | 20 | 10 | 2 | 4 | 6 | 1 | 1 | 4 | 5 | 55 | 50 | | | | | | | | | | |
| 5 | V | 214 | 80 | 7 | 20 | 8 | 4 | 0 | 6 | 1 | 1 | 4 | 5 | 51 | 46 | | | | | | | | | | |
| 6 | V | 250 | 80 | 7 | 20 | 10 | 4 | 0 | 6 | 1 | 1 | 4 | 5 | 53 | 48 | | | | | | | | | | |
| 7 | V | 074 | 80 | 7 | 20 | 10 | 2 | 4 | 6 | 1 | 1 | 4 | 5 | 55 | 50 | | | | | | | | | | |
| 8 | V | 090 | 70 | 7 | 20 | 10 | 4 | 0 | 5 | 1 | 1 | 4 | 5 | 52 | 47 | | | | | | | | | | |
| 9 | V | 265 | 70 | 7 | 20 | 10 | 4 | 0 | 5 | 1 | 1 | 4 | 5 | 52 | 47 | | | | | | | | | | |
| 10 | V | 067 | 79 | 7 | 20 | 15 | 4 | 0 | 6 | 1 | 1 | 4 | 5 | 58 | 53 | | | | | | | | | | |
| 11 | V | 250 | 30 | 7 | 20 | 10 | 6 | 6 | 5 | 1 | 1 | 4 | 5 | 60 | 55 | | | | | | | | | | |
| 12 | V | 335 | 78 | 7 | 20 | 10 | 6 | 4 | 6 | 1 | 1 | 4 | 5 | 59 | 54 | | | | | | | | | | |
| 13 | V | 310 | 74 | 7 | 20 | 10 | 6 | 6 | 5 | 1 | 1 | 4 | 5 | 60 | 55 | | | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | 51 | | | | | | | | | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | | III | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | REGULAR | | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 06

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|----|-----|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------|------------|---------------|----------|-----------|---------|------------|
| Z | Tipo de discontinuidad | Dip (Dielación, V, Ven) | DIP (BEZAMIENTO) | DIP (R/AZIMUT) | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR BÁSICO | RMR CORREGIDO | | | | |
| | | | | | sc | | ROD | Espaciamiento entre discontinuidad | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | | | | |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | Persistencia | | | | | Apertura | Rugosidad | Relleno | Alteración |
| 1 | D | 74 | 065 | | 12 | 13 | 8 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 55 | 50 | |
| 2 | D | 73 | 060 | | 12 | 13 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 52 | 47 | |
| 3 | D | 26 | 230 | | 12 | 13 | 8 | 6 | 4 | 3 | 4 | 3 | 10 | 5 | 63 | 58 | |
| 4 | D | 80 | 035 | | 7 | 13 | 5 | 4 | 0 | 3 | 2 | 3 | 10 | 5 | 47 | 42 | |
| 5 | D | 80 | 040 | | 7 | 13 | 8 | 4 | 0 | 3 | 2 | 3 | 10 | 5 | 50 | 45 | |
| 6 | D | 80 | 039 | | 12 | 13 | 5 | 4 | 0 | 3 | 2 | 3 | 10 | 5 | 52 | 47 | |
| 7 | D | 70 | 245 | | 7 | 13 | 8 | 4 | 0 | 5 | 2 | 3 | 10 | 5 | 52 | 47 | |
| 8 | D | 75 | 250 | | 7 | 13 | 8 | 4 | 0 | 5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 46 | 41 | |
| 9 | D | 20 | 345 | | 12 | 13 | 8 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 53 | 48 | |
| 10 | D | 20 | 230 | | 12 | 13 | 8 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 55 | 50 | |
| 11 | V | 70 | 255 | | 7 | 20 | 10 | 4 | 0 | 3 | 0 | 3 | 4 | 5 | 51 | 46 | |
| 12 | V | 86 | 045 | | 7 | 20 | 10 | 6 | 4 | 6 | 1 | 3 | 0 | 5 | 57 | 52 | |
| 13 | V | 70 | 065 | | 12 | 20 | 15 | 4 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 5 | 57 | 52 | |
| 14 | V | 55 | 110 | | 12 | 20 | 15 | 4 | 4 | 3 | 1 | 3 | 0 | 5 | 62 | 57 | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | 49 | | | | | |
| CLASE Nº | | | | | | | | | | | | III | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | REGULAR | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 07

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|----|-----|------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---------|------------|------------------|------------------------------|------------|---------------|
| % | Tipo de discontinuidad | D: Dirección, V: Veta | DIP (BUZAMIENTO) | DIPDIR (AZIMUT) | sc | | RQD | Espaciamiento entre discontinuidad | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR BÁSICO | RMR CORREGIDO |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Alteración | | | | |
| | | | | | 15 | 7 | | | | | | | | | | | |
| 1 | D | 70 | 050 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 77 | 72 | | |
| 2 | D | 60 | 195 | 12 | 20 | 15 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 81 | 76 | | |
| 3 | D | 70 | 245 | 7 | 20 | 5 | 6 | 4 | 3 | 4 | 3 | 10 | 5 | 62 | 57 | | |
| 4 | D | 60 | 250 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 3 | 4 | 3 | 10 | 5 | 72 | 67 | | |
| 5 | D | 45 | 163 | 12 | 20 | 15 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 79 | 74 | | |
| 6 | D | 62 | 200 | 12 | 20 | 15 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 81 | 76 | | |
| 7 | D | 70 | 070 | 12 | 20 | 8 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 70 | 65 | | |
| 8 | D | 60 | 066 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | | |
| 9 | D | 40 | 065 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 72 | 67 | | |
| 10 | D | 65 | 056 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | | |
| 11 | D | 40 | 190 | 12 | 20 | 15 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 79 | 74 | | |
| 12 | D | 74 | 050 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 75 | 70 | | |
| 13 | D | 66 | 170 | 12 | 20 | 8 | 4 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 73 | 68 | | |
| 14 | D | 70 | 234 | 12 | 20 | 15 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 79 | 74 | | |
| 15 | D | 70 | 075 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | | |
| 16 | D | 74 | 005 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 76 | 71 | | |
| 17 | D | 63 | 050 | 12 | 20 | 8 | 4 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 73 | 68 | | |
| 18 | D | 65 | 071 | 12 | 20 | 8 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 72 | 67 | | |
| 19 | D | 38 | 142 | 12 | 20 | 8 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 70 | 65 | | |
| 20 | V | 50 | 035 | 7 | 20 | 8 | 1 | 4 | 5 | 4 | 1 | 4 | 5 | 54 | 49 | | |
| 21 | V | 55 | 025 | 7 | 20 | 10 | 1 | 4 | 5 | 4 | 1 | 4 | 5 | 56 | 51 | | |
| 22 | V | 60 | 075 | 12 | 20 | 15 | 1 | 4 | 5 | 4 | 1 | 4 | 5 | 66 | 61 | | |
| 23 | D | 70 | 052 | 12 | 20 | 10 | 6 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 77 | 72 | | |
| 24 | D | 50 | 342 | 12 | 20 | 8 | 6 | 4 | 6 | 4 | 5 | 10 | 5 | 75 | 70 | | |
| 25 | D | 38 | 169 | 7 | 20 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 69 | 64 | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | 67 | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | | II | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | BUENA | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 08

| MAPEO GEOMECÁNICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|----|-----|------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---------|------------|------------------|------------------------------|------------|---------------|
| % | Tipo de discontinuidad | D: Dirección, V: Veta | DIP (BUZAMIENTO) | DIPDIR (AZIMUT) | sc | | RQD | Espaciamiento entre discontinuidad | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR BÁSICO | RMR CORREGIDO |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | Persistencia | Apertura | Rugosidad | Relleno | Alteración | | | | |
| | | | | | 15 | 7 | | | | | | | | | | | |
| 1 | D | 40 | 043 | 7 | 20 | 10 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 71 | 66 | | |
| 2 | D | 74 | 255 | 7 | 20 | 10 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 67 | 62 | | |
| 3 | D | 70 | 184 | 7 | 20 | 10 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 67 | 62 | | |
| 4 | D | 84 | 223 | 12 | 20 | 10 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 72 | 67 | | |
| 5 | D | 38 | 155 | 7 | 20 | 15 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 72 | 67 | | |
| 6 | D | 40 | 165 | 12 | 20 | 8 | 6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 10 | 5 | 74 | 69 | | |
| 7 | D | 70 | 260 | 7 | 20 | 8 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 10 | 5 | 67 | 62 | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | 65 | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | | II | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | BUENA | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Puntaje para la clasificación RMR estación CB - 10

| MAPEO GEOMECANICO RMR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|---|-----|--------------------------------------|--------------|---|---|---|---|-----------|------------------|------------------------------|------------|---------------|---------|------------|
| Z | D: Dirección, V: Veta | Tipos de discontinuidad | DPF (BUZAMIENTO) | DPF DIR (AZIMUT) | CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES | | | | | | | | | | Agua Subterránea | Orientación Discontinuidades | RMR BÁSICO | RMR CORREGIDO | | |
| | | | | | σc | | RQD | Espaciamiento entre Discontinuidades | Persistencia | | | | | Rugosidad | | | | | Relleno | Alteración |
| | | | | | Resistencia a la Compresión | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | |
| 1 | D | 58 | 246 | 4 | 13 | 8 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 15 | 5 | 60 | 55 | | | |
| 2 | D | 58 | 054 | 7 | 13 | 8 | 4 | 1 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 56 | 51 | | | |
| 3 | D | 84 | 090 | 4 | 13 | 8 | 4 | 1 | 6 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 54 | 49 | | | |
| 4 | D | 64 | 205 | 4 | 13 | 8 | 4 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 54 | 49 | | | |
| 5 | D | 54 | 110 | 4 | 13 | 8 | 4 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 52 | 47 | | | |
| 6 | D | 54 | 96 | 4 | 13 | 8 | 2 | 1 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 51 | 46 | | | |
| 7 | D | 50 | 195 | 4 | 13 | 8 | 4 | 1 | 6 | 4 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 58 | 53 | | | |
| 8 | D | 76 | 345 | 4 | 13 | 8 | 6 | 1 | 6 | 4 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 60 | 55 | | | |
| 9 | D | 80 | 348 | 4 | 13 | 8 | 4 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 52 | 47 | | | |
| 10 | V | 60 | 010 | NA | 13 | 8 | 1 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 45 | 40 | | | |
| 11 | D | 50 | 020 | 4 | 13 | 8 | 4 | 1 | 3 | 1 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 52 | 47 | | | |
| 12 | D | 52 | 210 | 4 | 13 | 8 | 4 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 52 | 47 | | | |
| 13 | D | 60 | 260 | 4 | 13 | 8 | 4 | 1 | 5 | 1 | 3 | 0 | 3 | 15 | 5 | 54 | 49 | | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | | | 40 | | | |
| CLASE N° | | | | | | | | | | | | | | | | | IV | | | |
| DESCRIPCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | MALA | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.2 Variaciones en el Q.

Enseguida, se muestra la clasificación obtenida por el sistema de clasificación Q (Barton et al.) para cada una de las estaciones realizadas en zonas mineralizadas.

Tabla 37. Clasificación por el método Q (estación CB – 01)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-------------------------------------------------------|----------------|-------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 96 |
| Número de discontinuidades | J _n | 4 |
| Número de rugosidad | J _r | 3 |
| Número de alteración | J _a | 2 |
| Número de agua subterránea | J _w | 1,0 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 10 |
| $Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$ | Q | 4 |
| CLASIFICACIÓN Q | | Pobre |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Clasificación por el método Q (estación CB-03)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 92 |
| Número de discontinuidades | J_n | 2 |
| Número de rugosidad | J_r | 1,5 |
| Número de alteración | J_a | 0,75 |
| Número de agua subterránea | J_w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 10 |
| $Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$ | Q | 9,20 |
| CLASIFICACIÓN Q | | Regular |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Clasificación por el método Q (estación CB-04)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 100 |
| Número de discontinuidades | J_n | 4 |
| Número de rugosidad | J_r | 3 |
| Número de alteración | J_a | 3 |
| Número de agua subterránea | J_w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 2,5 |
| $Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$ | Q | 10,00 |
| CLASIFICACIÓN Q | | Regular |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Clasificación por el método Q (estación CB-06)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 64 |
| Número de discontinuidades | J_n | 9 |
| Número de rugosidad | J_r | 1,5 |
| Número de alteración | J_a | 3 |
| Número de agua subterránea | J_w | 4 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 10 |
| $Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$ | Q | 1,42 |
| CLASIFICACIÓN Q | | Pobre |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Clasificación por el método Q (estación CB-07)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 99 |
| Número de discontinuidades | J_n | 9 |
| Número de rugosidad | J_r | 3 |
| Número de alteración | J_a | 1 |
| Número de agua subterránea | J_w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 2,5 |
| $Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$ | Q | 13,20 |
| CLASIFICACIÓN Q | | Buena |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Clasificación por el método Q (estación CB-08)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 100 |
| Número de discontinuidades | J_n | 4 |
| Número de rugosidad | J_r | 2 |
| Número de alteración | J_a | 1 |
| Número de agua subterránea | J_w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 3 |
| Q = (RQD/J_n) x (J_r / J_a) x (J_w/ SRF) | | Q |
| CLASIFICACIÓN Q | | Buena |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Clasificación por el método Q (estación CB-10)

| SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| PARÁMETROS | | VALOR |
| RQD % | RQD | 97 |
| Número de discontinuidades | J_n | 4 |
| Número de rugosidad | J_r | 3 |
| Número de alteración | J_a | 4 |
| Número de agua subterránea | J_w | 1 |
| Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional) | SRF | 10 |
| Q = (RQD/J_n) x (J_r / J_a) x (J_w/ SRF) | | Q |
| CLASIFICACIÓN Q | | Pobre |

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Análisis cinemático de cuñas.

3.4.1 Zonas mineralizadas.

Con el fin de hallar el peso específico de la roca se tomaron muestras en la etapa de campo para cada estación. Posterior al campo, se tomó el peso (en gramos) para cada muestra en una balanza y se halló su volumen (en centímetros cúbicos) por medio de la sumersión de cada muestra en un beaker que contenía 500 cm³ de agua, luego al realizar la resta del contenido total y el nivel en que quedó el agua después de dicha sumersión se obtiene el volumen. Finalmente, se hace una

división del peso entre el volumen obteniendo como resultado la densidad o peso específico de la roca (en g/cm³).

Veta Invasores Este.

Esta veta queda al norte del nivel 21 al costado derecho de la cruzada principal (lugar donde el mineral se descarga para posteriormente ser extraído de la mina) el cual tiene 92 metros de longitud. El peso específico de la roca fue de 2.7 t/m³ y con orientación 065 y una inclinación de cinta métrica de 32 grados.



Figura 42. Fotografía veta Invasores Este.

Tabla 44. Combinación de familias 1, 2 y 3 corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------------------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φ _r (°) | JRC |
| 1 | 81 | 204 | 10000 | 20 | 10 |
| 2 | 45 | 228 | 10000 | 20 | 10 |
| 3 | 83 | 044 | 10000 | 20 | 10 |

El análisis de cuñas para estas familias arroja los siguientes resultados:

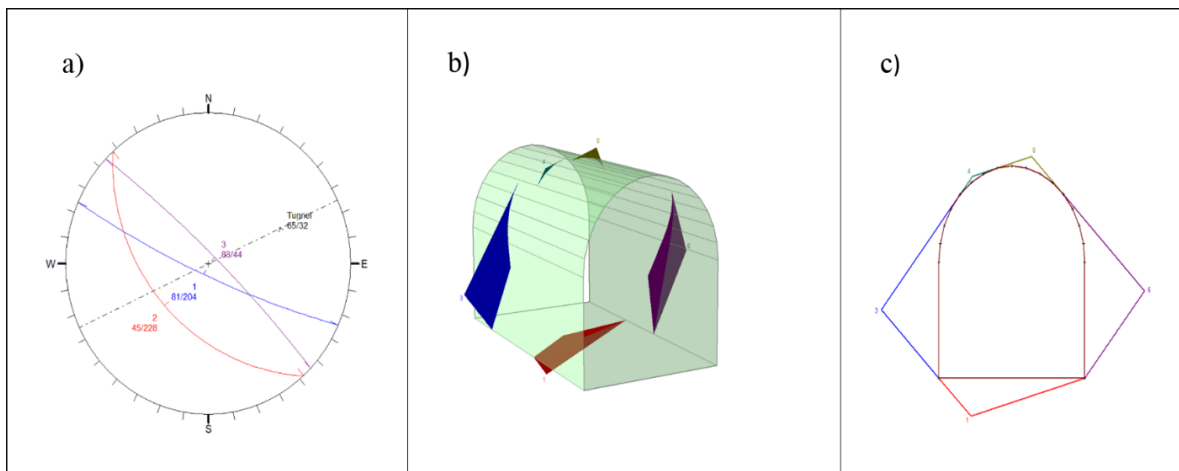


Figura 43. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 32/065. (b) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 45. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias 1, 2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Con malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Piso | 1 | 0.086 | 0.231 | estable | N/A | N/A |
| Pared inferior izquierda | 3 | 0.171 | 0.462 | 6.904 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 4 | 0.000 | 0.001 | 0.435 | N/A | N/A |
| Pared superior derecha | 8 | 0.003 | 0.007 | 0.000 | Remover | N/A |
| Pared inferior derecha | 6 | 0.191 | 0.517 | 9.401 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

En este caso las cuñas presentes en esta estación indican factores de seguridad muy altos como lo fueron las cuñas 3 y 6. Esto se debe a que la mayor parte del cuerpo de dichas cuñas están dentro del macizo rocoso además de la fricción interna. Por otro lado, las cuñas que se forman en la parte superior (techo) de la excavación son tan pequeñas que se recomienda desabombar el techo para no incurrir en sobrecostos y evitar accidentes mineros.

Este tipo de veta está caracterizada como veta arcillosa (caolinita, esmectita y sericita) y por estar muy fracturada además de presencia de abundante agua. El valor obtenido por el sistema Q fue de 0.80 (muy pobre) y de RMR es de 59.1 (regular), no obstante, los 97 metros que se han avanzado en esta veta son de mejor calidad que la de Invasores Norte por lo que se recomienda en un inicio la remoción de cuñas mediante el proceso de desabombe para posteriormente colocar soportes como pernos en puntos específicos que mitiguen futuros accidentes.

Veta Invasores Norte.

Esta veta queda al norte del nivel 21 al costado izquierdo de la cruzada principal con una longitud de 170 metros. Todo este tramo se encuentra sostenidos arcos de acero y madera entre arcos, debido a esto la toma de datos se realizó en el frente de explotación. El peso específico de la roca fue de 2.8 t/m^3 y La orientación de la excavación es 200 y un plunge 07 grados.



Figura 44. Fotografía veta Invasores Norte.

Tabla 46. Combinación de familias 1,2 y 3 correspondientes al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φr (°) | JRC |
| 1 | 87 | 016 | 10000 | 20 | 10 |
| 2 | 77 | 028 | 10000 | 20 | 10 |
| 3 | 72 | 240 | 10000 | 20 | 10 |

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

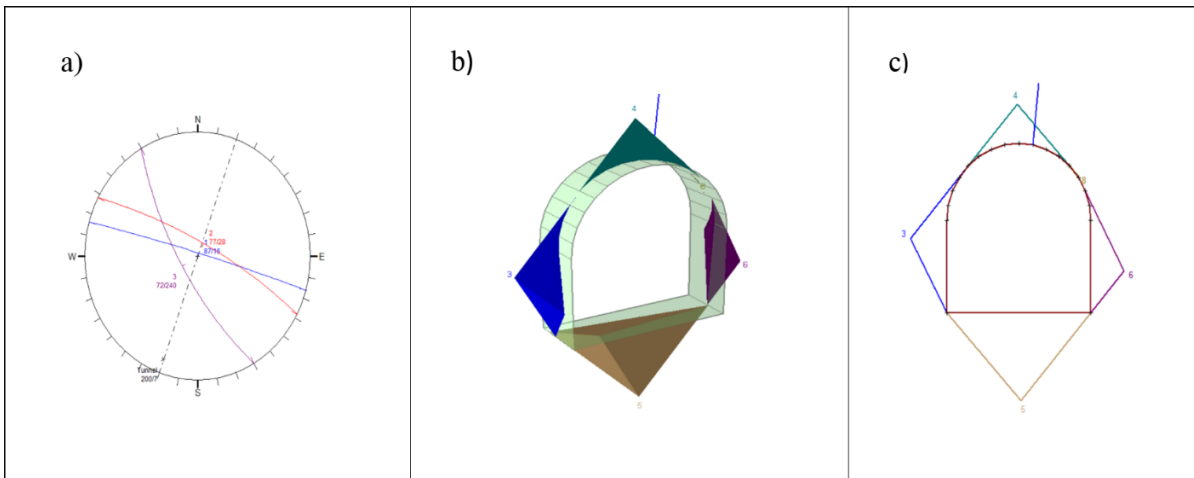


Figura 45. (a)Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 07/200. (b) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 47. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Con malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Piso | 5 | 0.241 | 0.675 | estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 3 | 0.054 | 0.150 | 2.85 | N/A | N/A |
| Techo | 4 | 0.027 | 0.075 | 0.000 | 9.94 | N/A |
| Pared derecha | 6 | 0.042 | 0.117 | 17.205 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia

En este caso las cuñas presentes en esta estación indican factores de seguridad bueno, no obstante, las cuñas que se forman en la parte superior de la excavación son tan pequeñas que se recomienda desabombar para posteriormente colocar un sostenimiento más robusto ya que esta veta está caracterizada por un alto fracturamiento, el cual está relleno por arcillas (caolinita, esmectita y sericita) y sulfuros altamente meteorizados por el agua. Por ello se trabajó con $\phi_r = 20$ ya que el valor obtenido por el sistema Q fue de 9.20 (regular) y de RMR es de 34 (mala), Por lo que se recomienda en un inicio la remoción de cuñas mediante el proceso de desabombe para posteriormente colocar soportes más robustos que mitiguen futuros accidentes como arcos en acero con hastiales en madera.

Sobreguía veta Ovejo.

La veta Ovejo se encuentra localizada al norte del nivel 21 y su entrada se realiza por el tambor de acceso, el cual queda ubicado en la cruzada Invasores Oeste. Esta estructura es un despegue de la Veta Dolores la cual tiene un comportamiento bastante arcilloso, no obstante, esta estructura no comparte del todo estas características y su calidad es mejor un poco mejor en comparación. El peso específico de la roca fue de 2.64 t/m^3 y La orientación de la excavación es 065 y un plunge 09 grados.

En esta veta se hicieron dos estaciones: una al este de esta sobreguía y la otra al oeste.

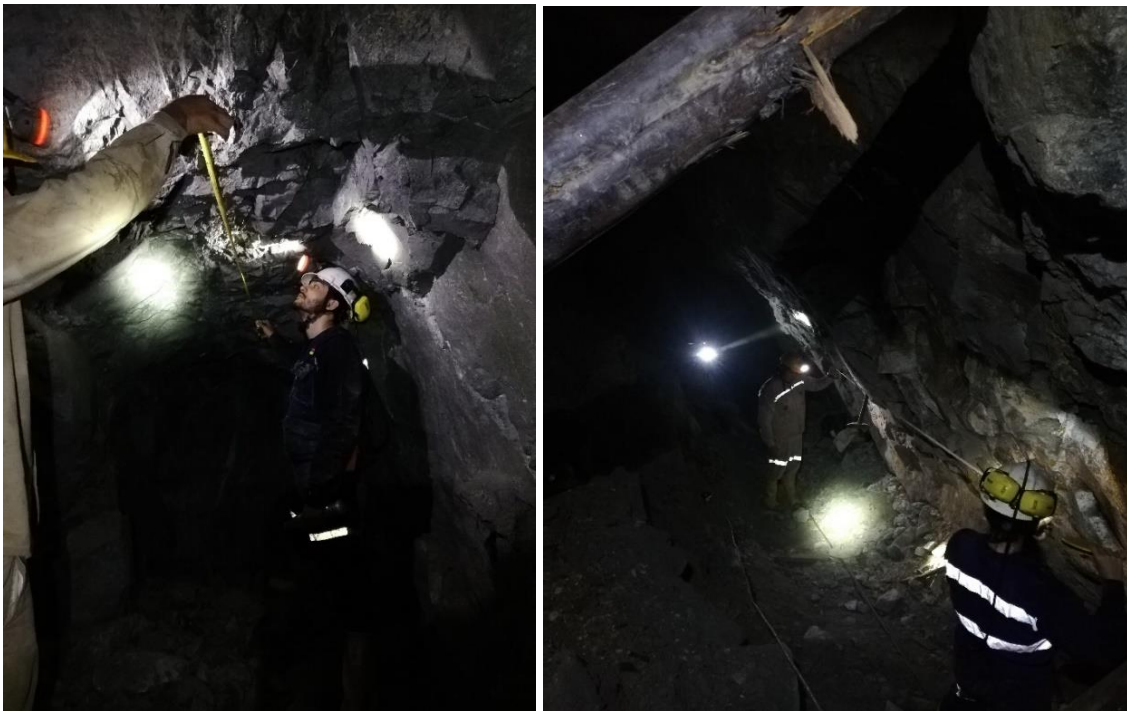


Figura 46. Fotografía tomada al este y al oeste de la sobreguía veta Ovejo.

Tabla 48. Combinación de familias 1, 2, 3 y 4 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φ_r (°) | JRC |
| 1 | 81 | 040 | 4405 | 20 | 2.3 |
| 2 | 72 | 063 | 4405 | 20 | 2.3 |
| 3 | 72 | 250 | 4405 | 20 | 2.3 |
| 4 | 23 | 230 | 4405 | 20 | 2.3 |

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

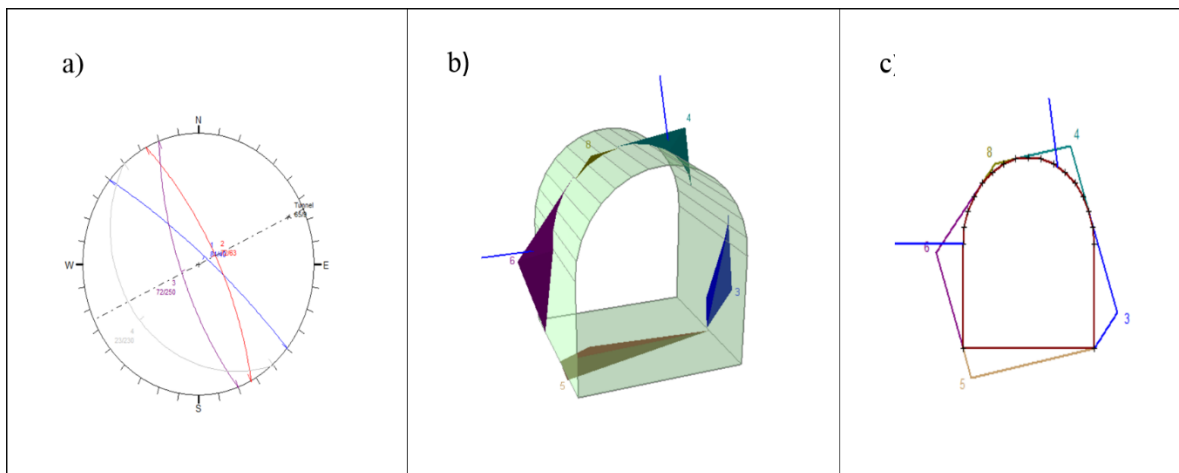


Figura 47. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 49. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Con malla con pernos |
|----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|----------------------|
| pared derecha | 3 | 0.028 | 0.074 | 1.52 | N/A | N/A |
| techo | 4 | 0.011 | 0.030 | 0.000 | 301.900 | N/A |
| Piso | 5 | 0.042 | 0.112 | Estable | N/A | N/A |

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Con malla con pernos |
|--------------------|---|------------------------------|---------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Pared izquierda | 6 | 0.043 | 0.114 | 1.125 | 75.631 | N/A |
| techo | 8 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | Remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

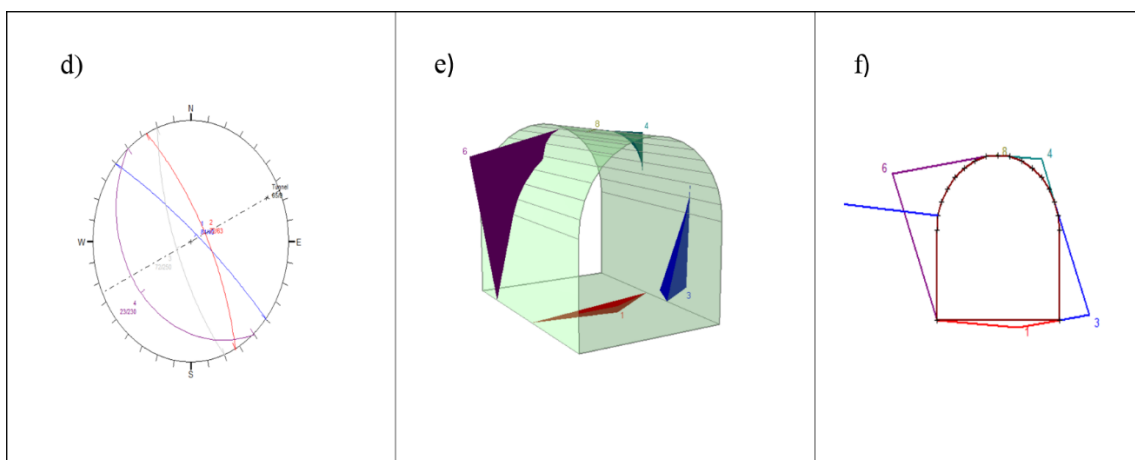


Figura 48. (d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.

Tabla 50. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------|---|------------------------------|---------------|-------------------|-------------------------|---------------------|
| piso | 1 | 0.013 | 0.034 | Estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 3 | 0.047 | 0.047 | 16.43 | N/A | N/A |
| techo | 4 | 0.006 | 0.015 | 0.143 | Remove | N/A |
| Pared izquierda | 6 | 0.225 | 0.594 | 1.099 | 95.24 | N/A |
| techo | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

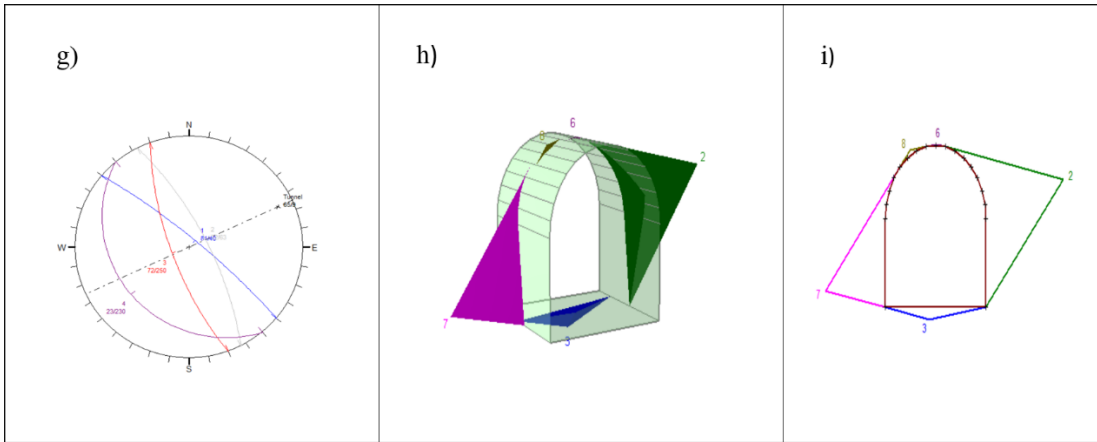


Figura 49. (g)Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (h) cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.

Tabla 51.Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | Altura de ápice (m) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Con maya con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|---------------------|----------------|----------------------|---------------------|
| Pared izquierda | 2 | 0.845 | 2.230 | | 2.158 | N/A | N/A |
| Piso | 3 | 0.030 | 0.080 | | Estable | N/A | N/A |
| Techo | 6 | 0.000 | 0.000 | | Remove r | N/A | N/A |
| Pared derecha | 7 | 0.362 | 0.956 | | 8.047 | N/A | N/A |
| Techo | 8 | 0.001 | 0.002 | | remover | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

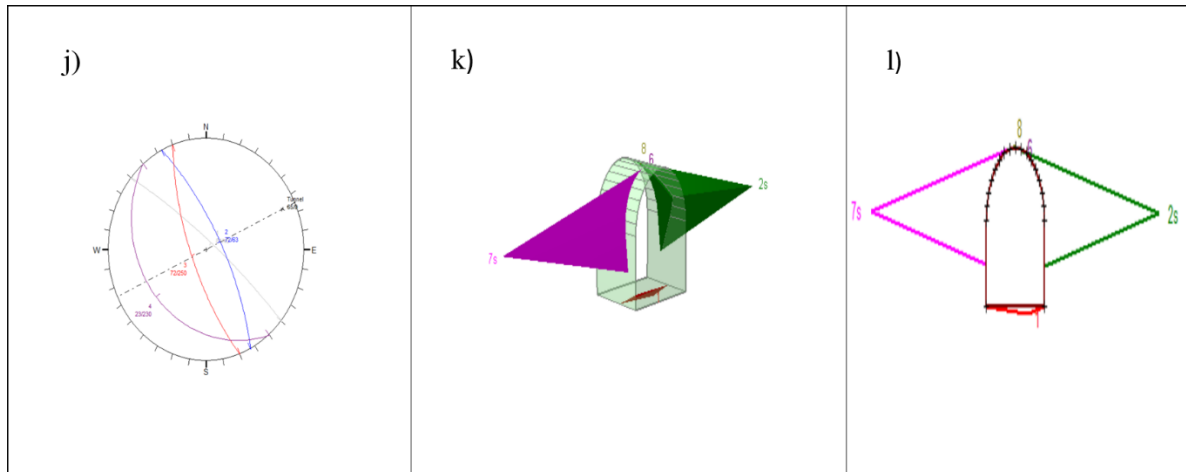


Figura 50. (j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2,3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.

Tabla 52. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 0.009 | 0.025 | Estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 2 | 1.317 | 3.477 | 13.268 | N/A | N/A |
| Techo | 6 | 0.000 | 0.000 | 0.304 | remove | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 1.294 | 3.417 | 8.048 | N/A | N/A |
| techo | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

La segunda estación realizada fue al oeste de la sobreguía veta Ovejo y el peso específico de la roca fue de 2.93 t/m³.

Tabla 53. Combinación de familias 1,2,3 y 4 del este de esta sobre guía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φr (°) | JRC |
| 1 | 60 | 129 | 5313 | 20 | 9 |
| 2 | 30 | 010 | 5313 | 20 | 9 |

| | | | | | |
|---|----|-----|------|----|---|
| 3 | 82 | 056 | 5313 | 20 | 9 |
| 4 | 83 | 131 | 5313 | 20 | 9 |

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

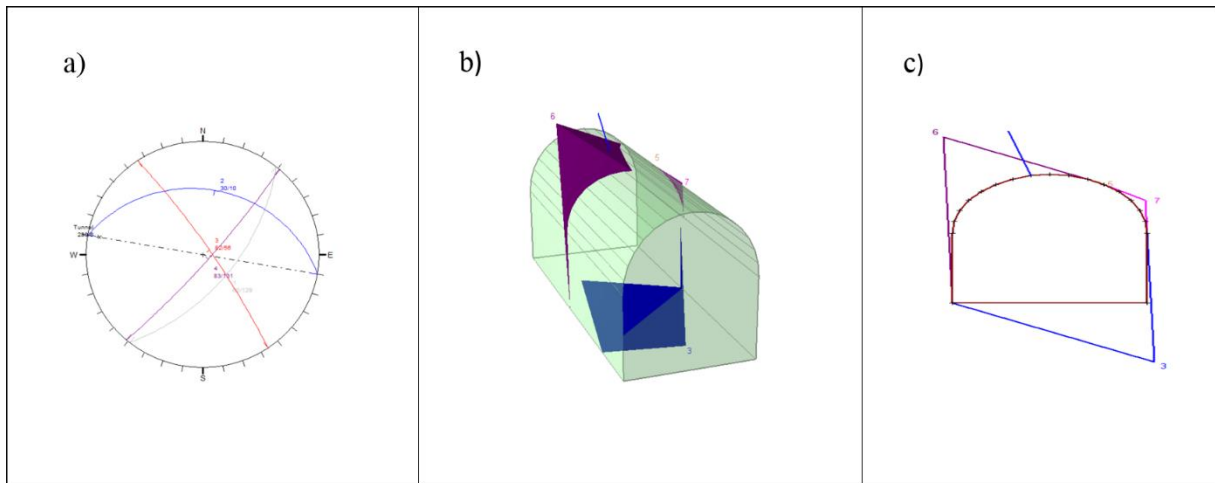


Figura 51. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2,3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 54. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Estable | 3 | 1.547 | 4.612 | estable | N/A | N/A |
| Techo | 5 | 0.000 | 0.000 | 0.572 | Remove | N/A |
| Techo | 6 | 0.607 | 1.779 | 0.000 | 7.278 | N/A |
| Pared derecha | 7 | 0.009 | 0.027 | 0.337 | Remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

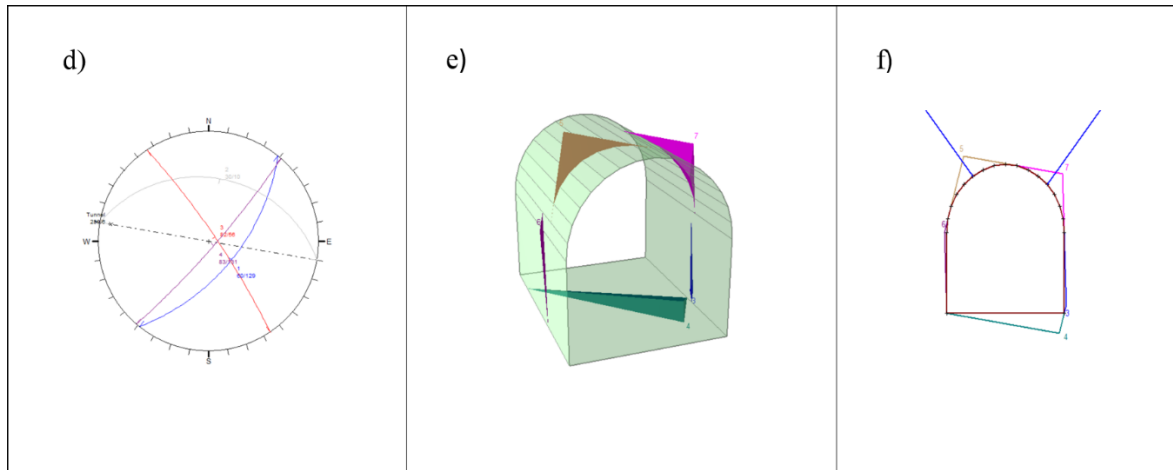


Figura 52. d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2,3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.

Tabla 55. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared derecha | 3 | 0.001 | 0.002 | 1.588 | N/A | N/A |
| Piso | 4 | 0.027 | 0.079 | Estable | Remover | N/A |
| Techo | 5 | 0.018 | 0.052 | 0.572 | 420.28 | N/A |
| Pared izquierda | 6 | 0.001 | 0.003 | 0.3386 | Remover | N/A |
| techo | 7 | 0.015 | 0.044 | 0.337 | 384.23 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

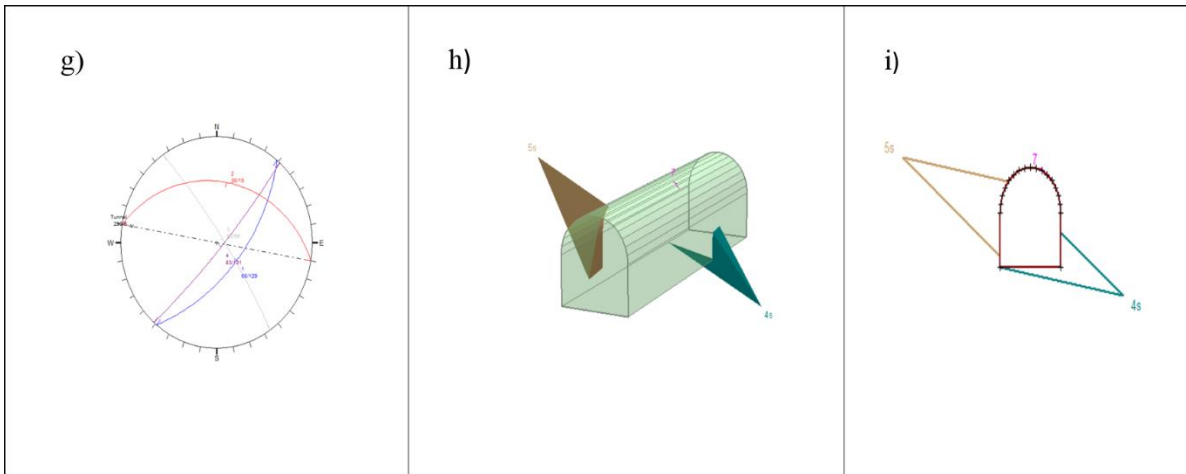


Figura 53. (g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 4 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.

Tabla 56. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,2 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared derecha y piso | 4 | 0.389 | 1.139 | Estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 5 | 1.358 | 3.978 | 5.543 | N/A | N/A |
| techo | 7 | 0.000 | 0.000 | 0.337 | Remover | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

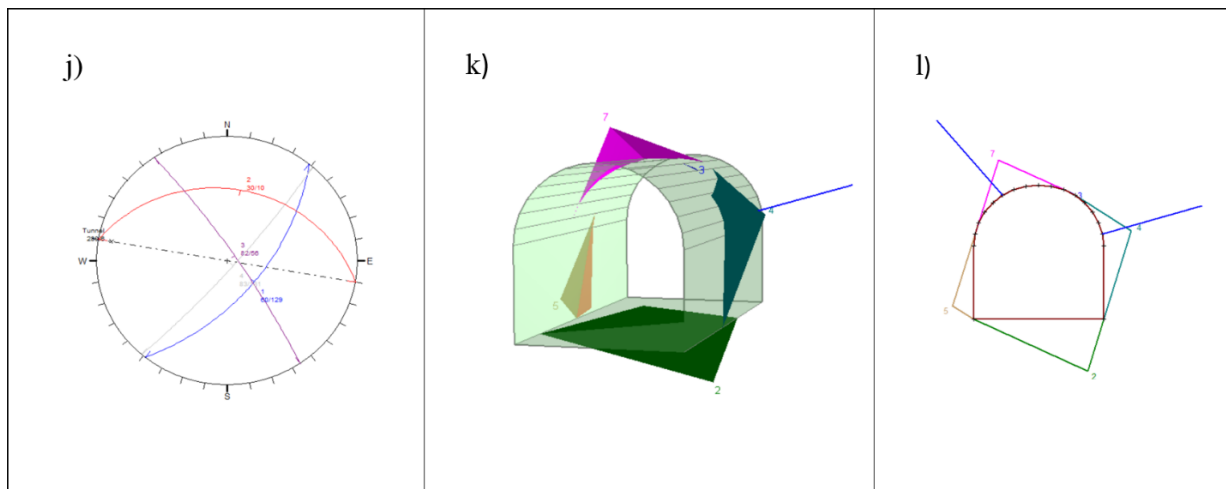


Figura 54. (j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1,2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 09/065. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.

Tabla 57. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 2 | 1.232 | 3.610 | Estable | N/A | N/A |
| Techo | 3 | 0.00 | 0.000 | 1.586 | N/A | N/A |
| Pared derecha | 4 | 0.219 | 0.641 | 14 | 26.246 | N/A |
| Pared izquierda | 5 | 0.077 | 0.225 | 3.399 | N/A | N/A |
| techo | 7 | 0.195 | 0.571 | 0.386 | 36.25 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

Las cuñas presentes en esta estación indican factores de seguridad aceptables, esto se debe a que esta veta no se encuentra tan fracturada, sin embargo, si es una veta arcillosa por lo que la calidad de la roca para esta excavación en Sistema Q fue de 1.42 (pobre) y de RMR es de 49 (Regular) por lo que se trabajó con $\phi_r = 20$. Las cuñas fueron formadas por las familias: 1,2,3; 1,3,4; 2,3,4; 1,2,4. Por lo que se recomienda colocar pernos de sistemática y maya con pernos en zonas más fracturadas ya que esta veta es un despegue de la veta Dolores.

Veta 2511.

Esta veta se localiza al lado más sur del nivel 21 con unos 230 metros de longitud al costado izquierdo de la cruzada principal. Todo este tramo se encuentra con pernos ocasionales y algunos arcos de acero en puntos específicos. Esta excavación esta sobre la veta Y es una estructura paralela a la veta santa Inés.

Para esta veta se llevaron a cabo dos estaciones. La primera se realizó al este de la veta y el peso específico de la roca fue de 2.61 t/m³ y La orientación de la excavación es 270 y un plunge 04 grados.



Figura 55. Fotografía veta 2511.

Tabla 58. Combinación de familias 1,2,3,4 y 5 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φ_r (°) | JRC |
| 1 | 68 | 052 | 6618 | 30 | 8 |
| 2 | 65 | 071 | 6618 | 30 | 8 |
| 3 | 40 | 158 | 6618 | 30 | 8 |
| 4 | 67 | 243 | 6618 | 30 | 8 |
| 5 | 61 | 198 | 6618 | 30 | 8 |

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

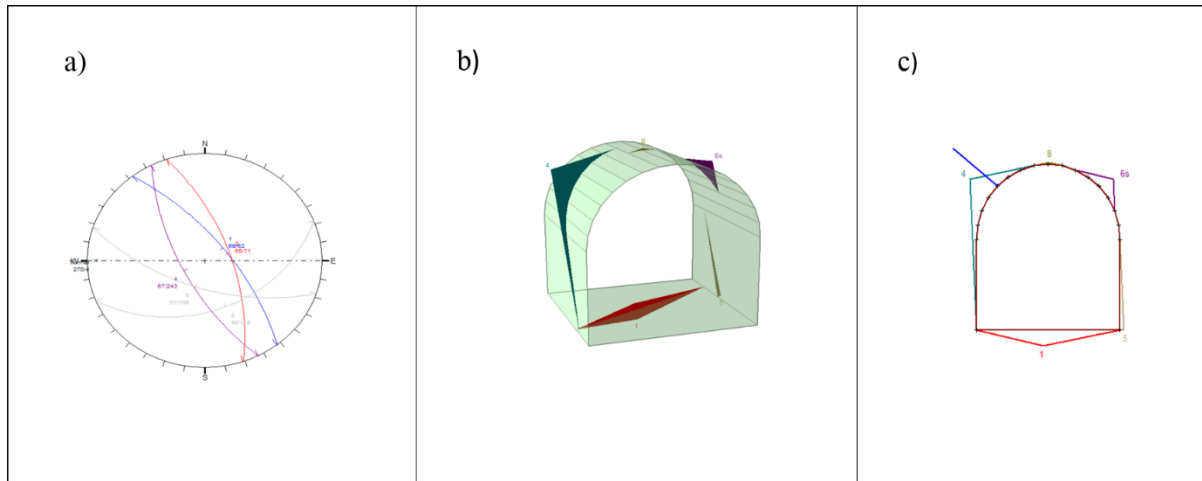


Figura 56. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 4 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 59. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 0.029 | 0.076 | Estable | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 4 | 0.019 | 0.049 | 1.11 | 28.92 | N/A |
| Pared inferior derecha | 5 | 0.000 | 0.001 | 34.76 | N/A | N/A |
| Pared superior derecha | 6 | 0.005 | 0.012 | 2.91 | N/A | N/A |
| techo | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | Remover | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

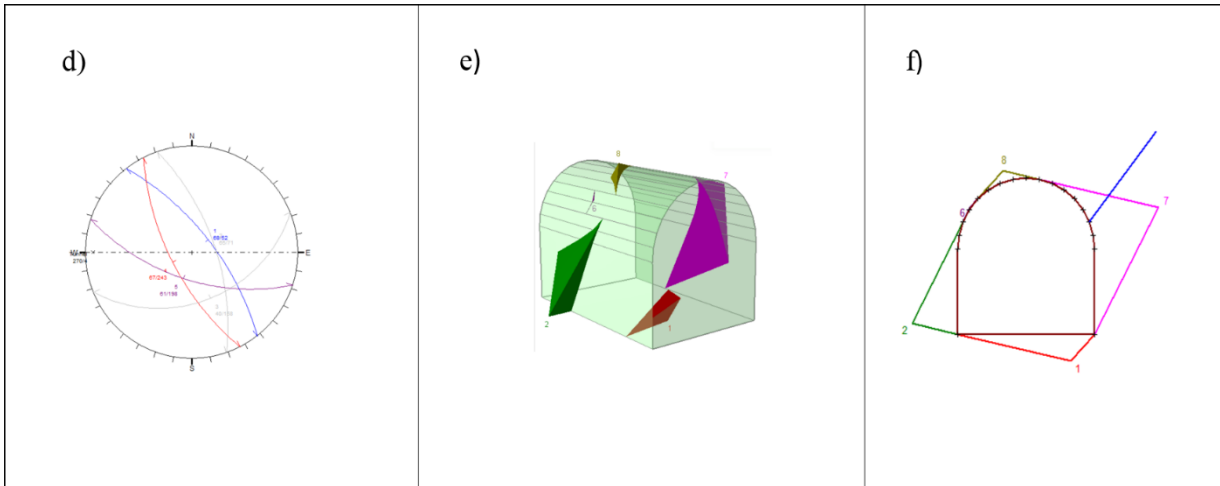


Figura 57. (d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.

Tabla 60. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 0.104 | 0.2716 | Estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 2 | 0.274 | 0.716 | 19.11 | N/A | N/A |
| Techo | 6 | 0.000 | 0.000 | 1.166 | Remover | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 0.777 | 2.028 | 1.119 | 28.21 | N/A |
| techo | 8 | 0.008 | 0.020 | 0.000 | Remover | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

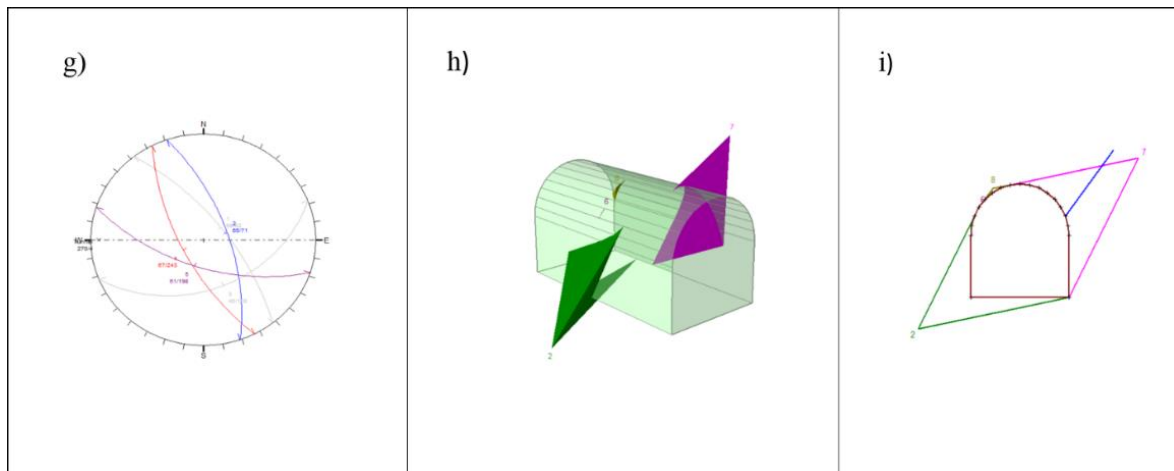


Figura 58. (g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.

Tabla 61. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared izquierda | 2 | 0.808 | 2.110 | Estable | N/A | N/A |
| Techo | 6 | 0.000 | 0.000 | 1.166 | remover | N/A |
| Pared derecha | 7 | 1.799 | 4.695 | 1.079 | 28.17 | N/A |
| techo | 8 | 0.001 | 0.003 | 0.000 | remover | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

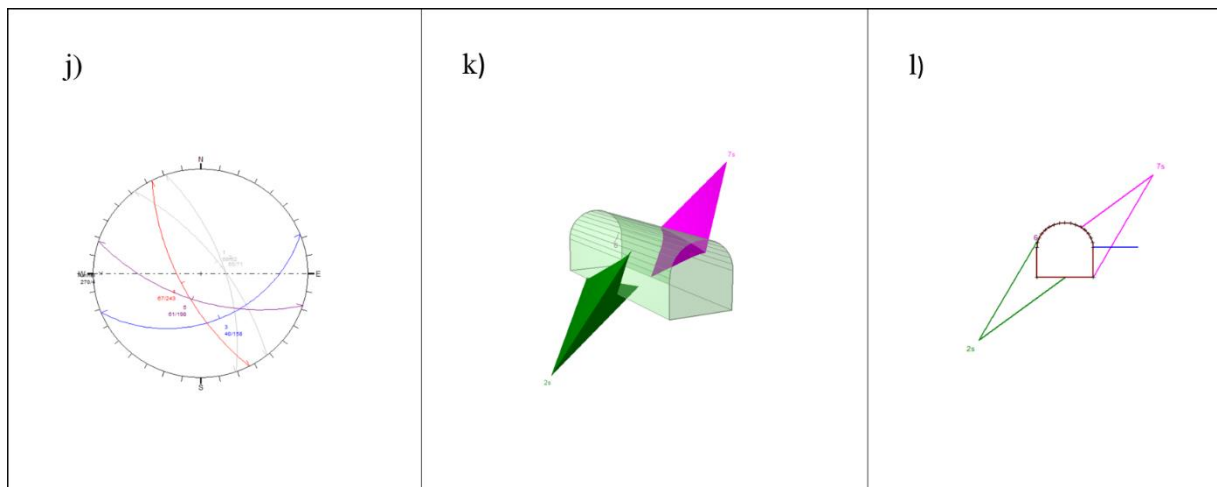


Figura 59. (j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 3, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/270. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.

Tabla 62. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 3, 4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared izquierda | 2 | 4.340 | 11.328 | estable | N/A | N/A |
| Techo | 6 | 0.000 | 0.000 | 1.166 | Remover | N/A |
| Pared derecha | 7 | 4.356 | 11.368 | 1.923 | 34.74 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

La segunda estación se realizó en este mismo sector, al oeste de la veta y el peso específico de la roca fue de 2.7 t/m^3 . La orientación de la excavación es 095 y su *plunge* es de 05 grados.

Tabla 63. Combinación de familias 1, 2, 3 y 4 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φ_r (°) | JRC |
| 1 | 90 | 204 | 10000 | 30 | 10 |
| 2 | 67 | 187 | 10000 | 30 | 10 |
| 3 | 54 | 354 | 10000 | 30 | 10 |
| 4 | 65 | 053 | 10000 | 30 | 10 |

Los análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

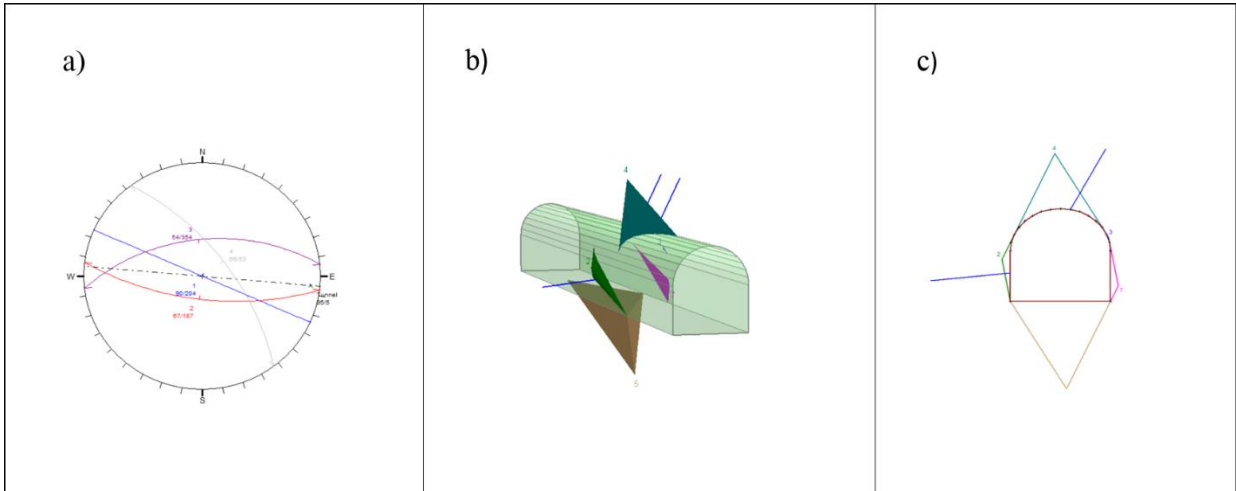


Figura 60. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 64. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared izquierda | 2 | 0.164 | 0.443 | 18.510 | N/A | N/A |
| Pared derecha superior | 3 | 0.000 | 0.001 | 9.515 | Remover | N/A |
| Techo | 4 | 3.121 | 8.427 | 1.894 | 89.32 | N/A |
| Piso | 5 | 11.355 | 30.658 | Estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 7 | 0.125 | 0.337 | 1.996 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

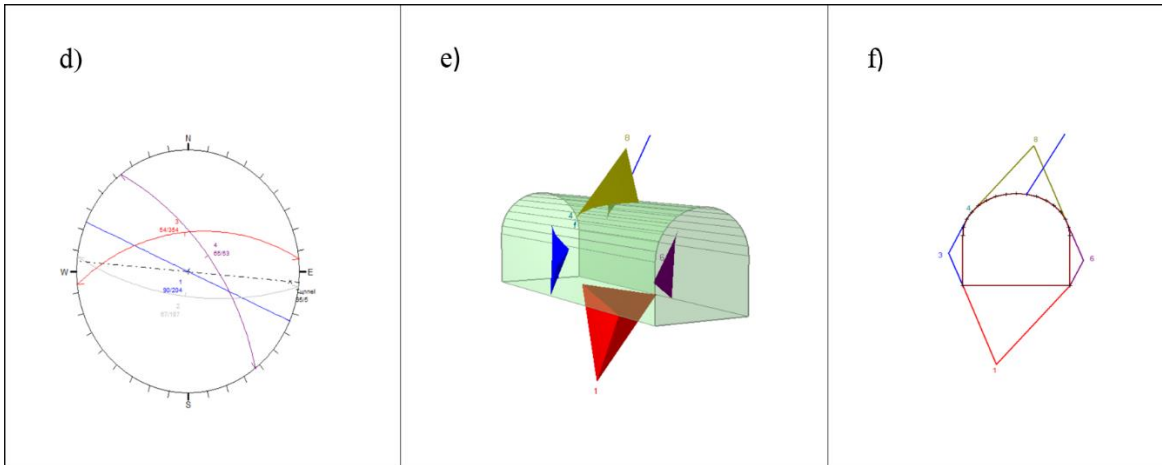


Figura 61. (d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.

Tabla 65. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 3.373 | 9.108 | Estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 3 | 0.093 | 0.252 | 7.771 | N/A | N/A |
| Techo | 4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | N/A |
| Pared izquierda | 6 | 0.084 | 0.227 | 1.996 | N/A | N/A |
| techo | 8 | 0.862 | 2.326 | 0.000 | 7.3777 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

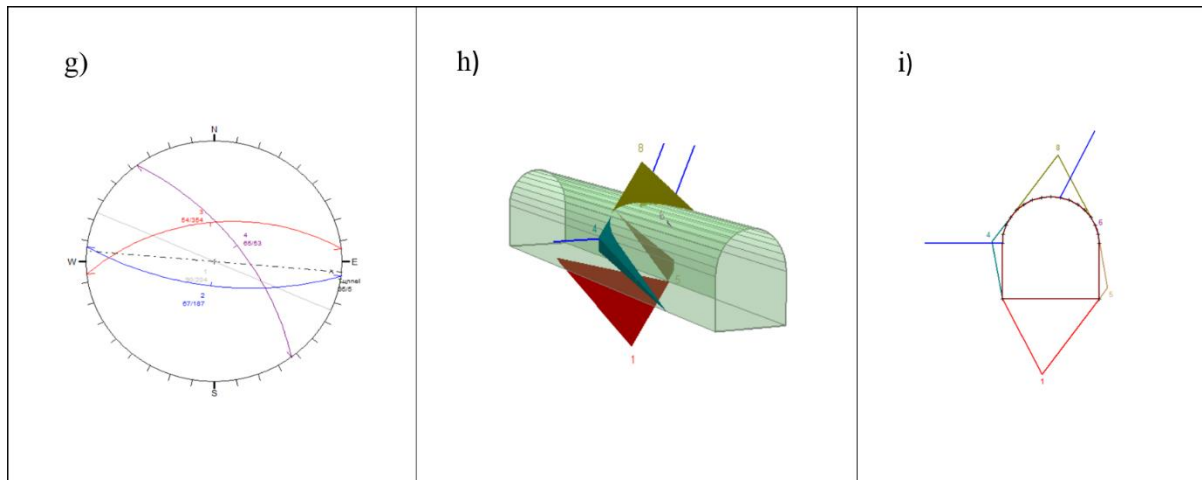


Figura 62. (g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.

Tabla 66. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Estable | 1 | 7.369 | 7.369 | Estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 4 | 0.271 | 0.732 | 1.164 | 15.98 | N/A |
| Pared derecha | 5 | 0.158 | 0.158 | 2.118 | N/A | N/A |
| Pared superior derecha | 6 | 0.000 | 0.000 | 1.996 | N/A | N/A |
| Techo | 8 | 1.518 | 1.518 | 0.000 | 3.893 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

Esta veta tiene tres tipos de cuñas que necesitan siempre sostenimiento y que están formadas por las combinaciones 2,3,4; 3,4,5; 1,2,3; 1,3,4; 1,2,4; 1,4,5; 2,4,5. La primera se observa al lado este de esta veta y siempre está localizada al costado derecho de la excavación. Por otro lado, el oeste de esta veta presenta dos cuñas que tiene un tamaño importante y que siempre necesitan sostenimiento, que son las cuñas formadas en el techo y lada izquierdo de la excavación. por lo que se recomienda poner pernos en puntos específicos y desabombe de cuñas pequeñas. Además, la calidad de la roca para esta estación es buena con un RMR de 67.48 (buena) y un valor del

sistema Q de 3.75 (pobre), exceptuando los puntos donde están los arcos y se trabajó con un ángulo $\phi_r = 30$.

Guía Veta Dolores.

Esta veta se localiza al lado más norte del nivel 21 con unos 203 metros de longitud, al costado izquierdo de la cruzada principal. Todo este tramo se encuentra sostenido por arcos de acero y madera entre arcos, debido a esto la toma de datos se realizó en el frente de explotación. El peso específico de la roca fue de 2.06 t/m^3 y La orientación de la excavación es 135 y un plunge 04 grados.



Figura 63. Fotografía veta Dolores.

Tabla 67. Combinación de familias 1, 2, 3, 4 y 5 del este de esta sobreguía corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φ_r (°) | JRC |
| 1 | 78 | 347 | 2203 | 16 | 9 |
| 2 | 54 | 103 | 2203 | 16 | 9 |
| 3 | 59 | 253 | 2203 | 16 | 9 |
| 4 | 55 | 203 | 2203 | 16 | 9 |
| 5 | 55 | 015 | 2203 | 16 | 9 |

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

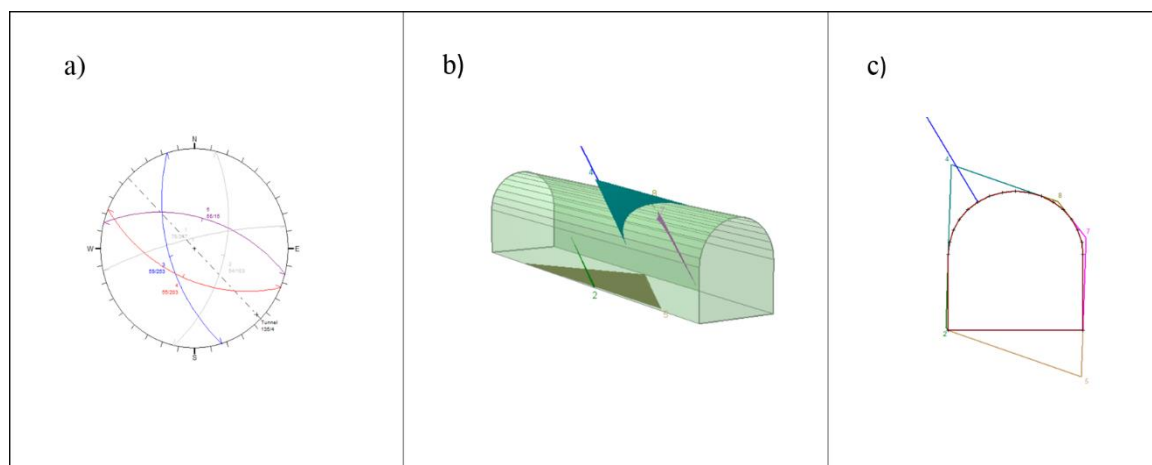


Figura 64. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 3, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 68. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias de diaclasas 3, 4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared derecha | 2 | 0.002 | 0.003 | 1.136 | Remover | N/A |
| Techo | 4 | 0.394 | 0.813 | 0.686 | 13.869 | N/A |

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 5 | 0.875 | 1.803 | Estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 0.007 | 0.014 | 1.083 | Remover | N/A |
| techo | 8 | 0.001 | 0.002 | 0.000 | remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

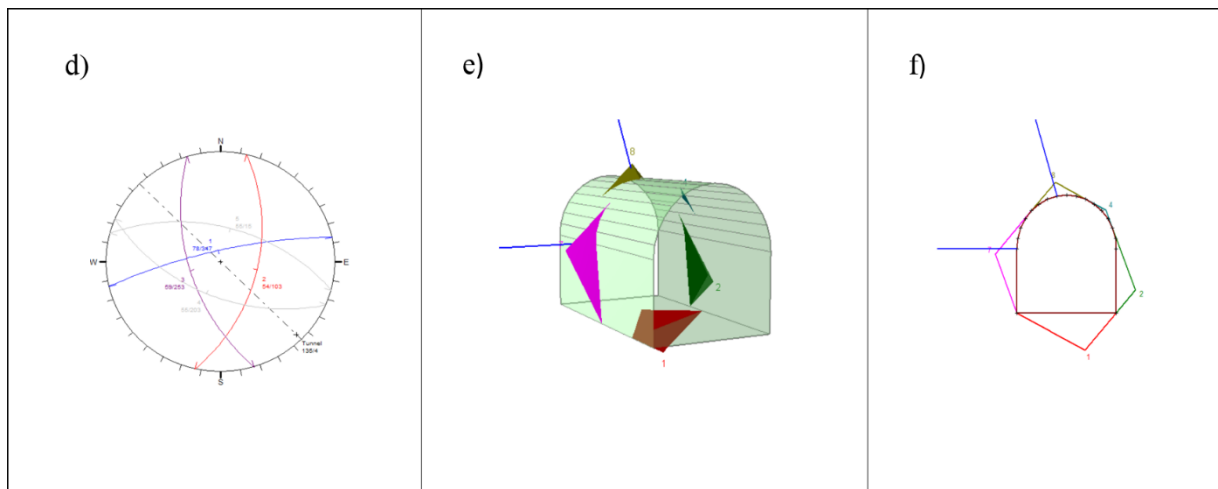


Figura 65. (d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.

Tabla 69. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 0.526 | 1.084 | Estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 2 | 0.126 | 0.259 | 1.664 | N/A | N/A |
| Pared superior derecha | 4 | 0.002 | 0.003 | 0.345 | Remover | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 0.189 | 0.390 | 0.739 | 20.97 | N/A |
| Techo | 8 | 0.027 | 0.057 | 0.000 | 161.230 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

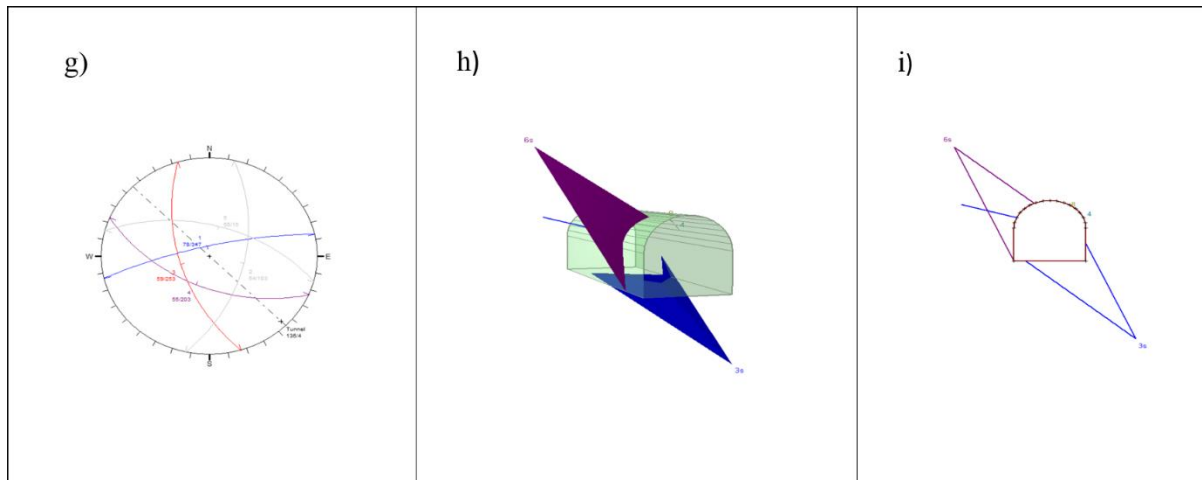


Figura 66. (g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.

Tabla 70. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 3 | 3.947 | 8.947 | Estable | N/A | N/A |
| Techo | 4 | 0.000 | 0.000 | 0.584 | Remover | N/A |
| Techo | 6 | 2.954 | 6.085 | 0.67 | 3.207 | N/A |
| Techo y pared izquierda | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Remover | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

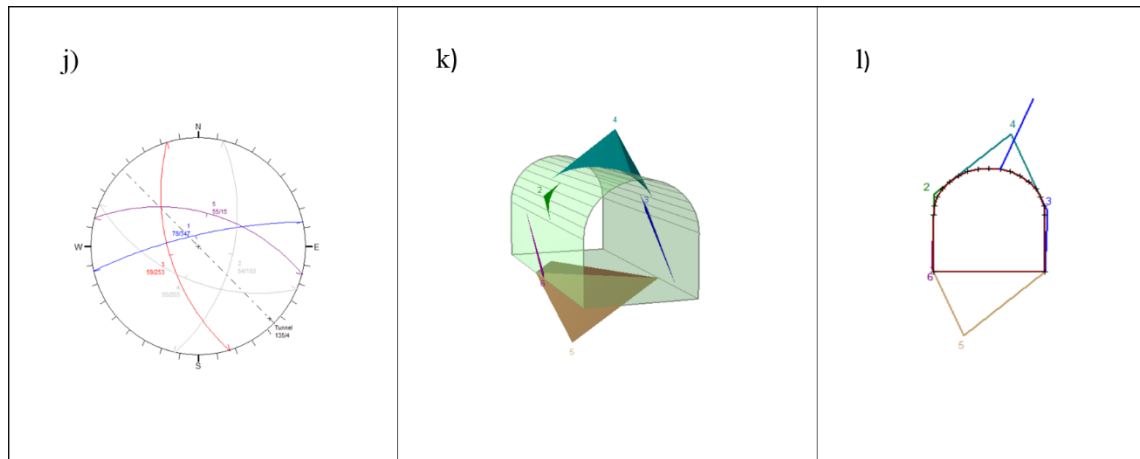


Figura 67. (j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.

Tabla 71. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Con malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Pared superior izquierda | 2 | 0.002 | 0.005 | 1.276 | Remove | N/A |
| Pared derecha | 3 | 0.003 | 0.005 | 1.174 | Remove | N/A |
| Techo | 4 | 0.243 | 0.500 | 0.299 | 95.74 | N/A |
| Piso | 5 | 1.213 | 2.499 | Estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 6 | 0.001 | 0.003 | 1.091 | Remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

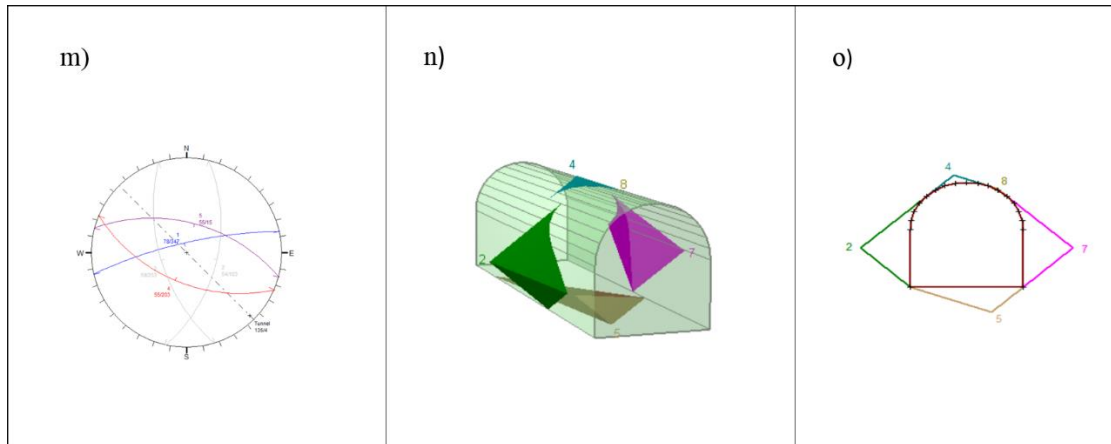


Figura 68. (m) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (n) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (o) Estabilización de cuñas.

Tabla 72. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Con malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Pared izquierda | 2 | 0.556 | 1.146 | 5.465 | N/A | N/A |
| techo | 4 | 0.013 | 0.026 | 0.584 | remover | N/A |
| Piso | 5 | 0.379 | 0.780 | Estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 7 | 0.564 | 1.163 | 5.7 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | Remover | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

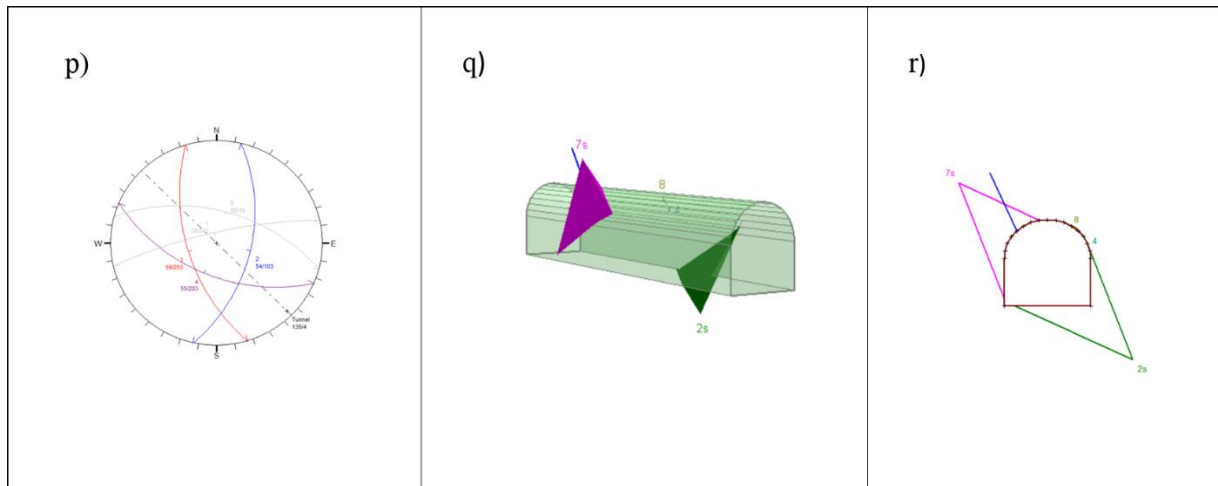


Figura 69. (p) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el tramo del túnel con dirección 04/135. (q) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (r) Estabilización de cuñas.

Tabla 73. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared derecho y piso | 2 | 2.211 | 4.555 | Estable | N/A | N/A |
| Techo | 4 | 0.000 | 0.000 | 1.996 | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 2.115 | 4.356 | 1.132 | 2.575 | N/A |
| Techo | 8 | 0.000 | 0.001 | 0.00 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

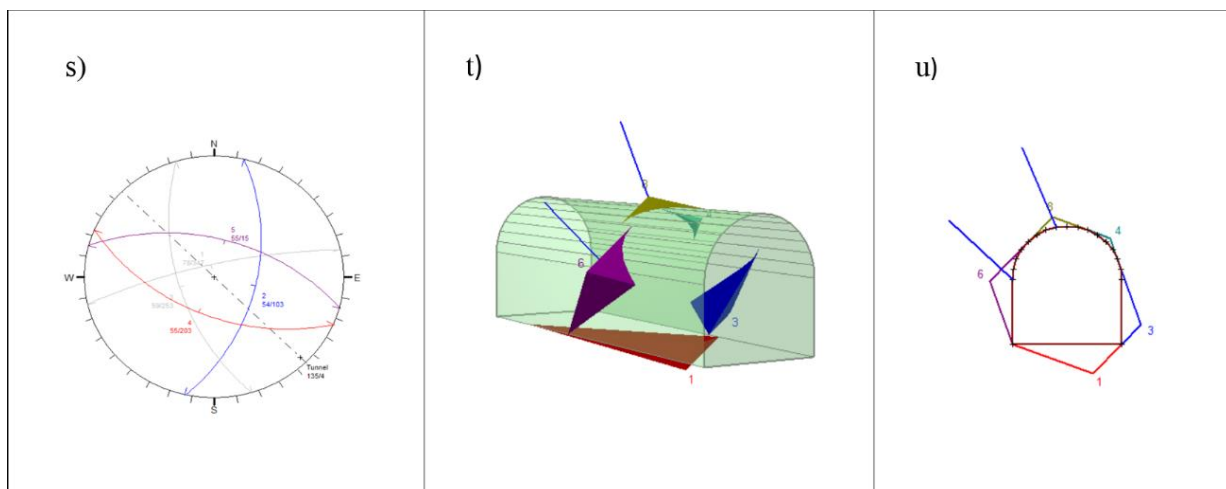


Figura 70.(s) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 4 y 5 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (t) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (u) Estabilización de cuñas.

Tabla 74. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2,4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 0.575 | 1.184 | estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 3 | 0.172 | 0.354 | 1.668 | N/A | N/A |
| Pared superior derecha | 4 | 0.007 | 0.014 | 1.084 | Remove | N/A |
| Pared izquierda | 6 | 0.288 | 0.593 | 1.007 | 23.805 | N/A |
| techo | 8 | 0.025 | 0.051 | 0.00 | 164.95 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

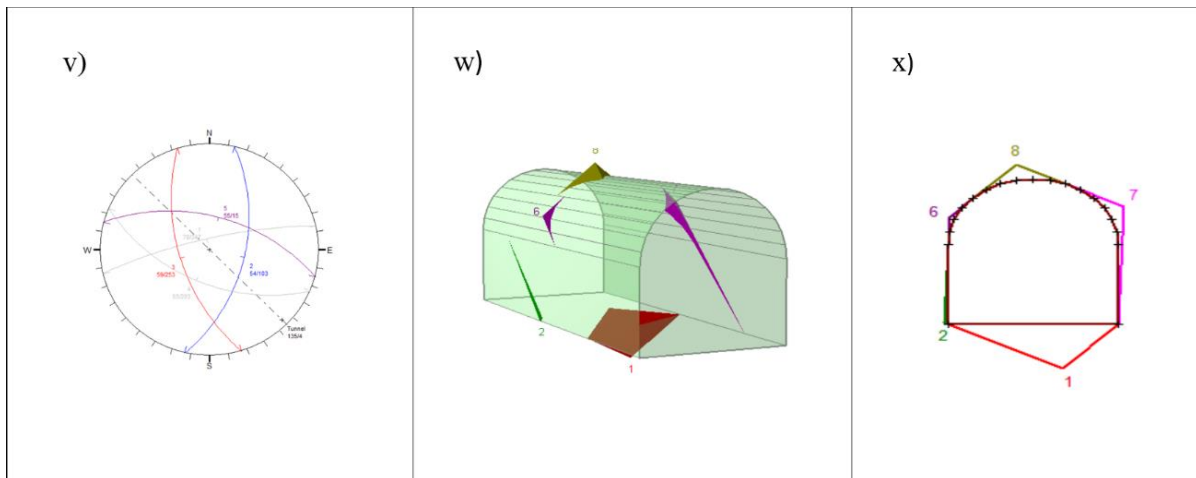


Figura 71.(v) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 5 en el tramo del túnel con dirección 05/095. (w) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (x) Estabilización de cuñas.

Tabla 75. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 0.638 | 1.314 | Estable | N/A | N/A |

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared izquierda | 2 | 0.002 | 0.003 | 5.816 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 6 | 0.003 | 0.006 | 0.890 | Remove | N/A |
| Pared derecha | 7 | 0.029 | 0.059 | 0.949 | Remove | N/A |
| techo | 8 | 0.032 | 0.066 | 0.000 | Remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

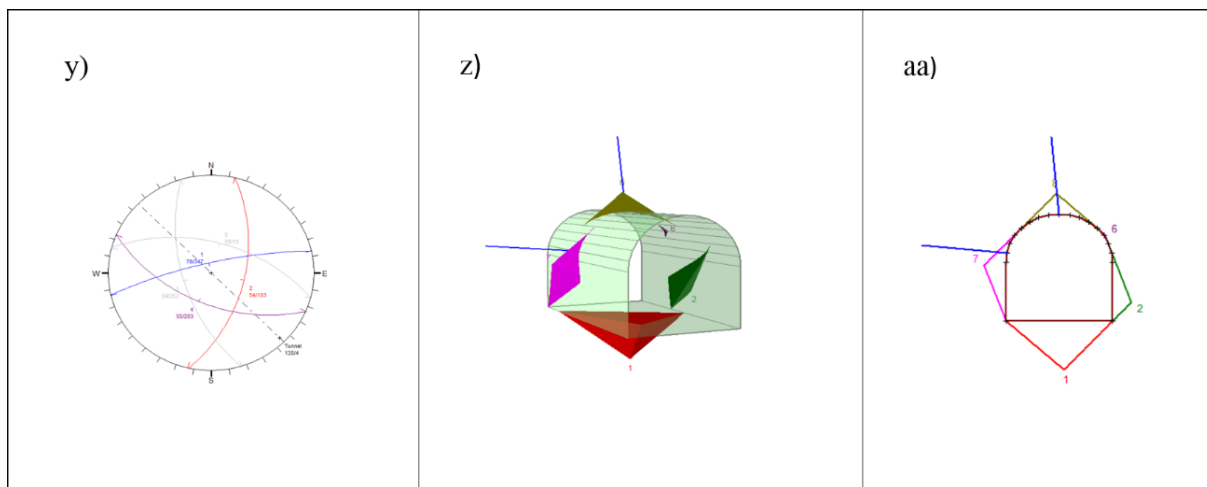


Figura 72. (y) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 4 en el trazado del túnel con dirección 05/095. (z) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (aa) Estabilización de cuñas.

Tabla 76. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1,2 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 1.070 | 2.205 | estable | N/A | N/A |
| Pared derecha | 2 | 0.128 | 0.263 | 1.697 | N/A | N/A |
| Techo | 6 | 0.000 | 0.001 | 1.104 | Remove | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 0.202 | 0.416 | 0.874 | 21.814 | N/A |
| techo | 8 | 0.092 | 0.190 | 0.000 | 51.978 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

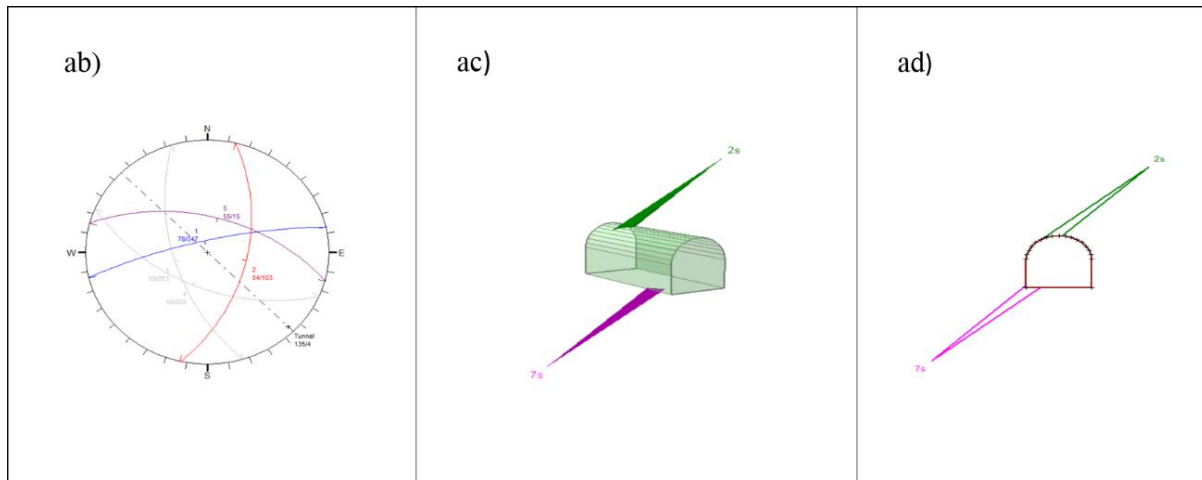


Figura 73.(ab) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 5 en el trazado del túnel con dirección 05/095. (ac) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (ad) Estabilización de cuñas.

Tabla 77. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Techo | 2 | 0.123 | 0.253 | 1.908 | N/A | N/A |
| piso | 7 | 0.144 | 0.298 | estable | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

Las cuñas presentes en esta estación indican factores de seguridad aceptables, esto se debe a que la mayor parte del cuerpo de dichas cuñas están dentro del respaldo, además de la fricción interna. No obstante, esta veta tiene dos tipos de cuñas que necesitan casi siempre sostenimiento. La primera se observa en el techo de la excavación y cuenta con factores de seguridad muy cercanos a 0.00, Por otra parte, la cuña que se forma al lado izquierdo de la excavación tiene factores de seguridad mayores a 0.5, estos tipos de cuñas son formadas por las combinaciones de diaclasas 1, 2, 4; 1, 2, 3; 1, 3, 4; 5,4,1; 2,3,4; 5,2,3. por lo que se colocar soportes más robustos que mitiguen futuros accidentes como arcos en acero con hastiales en madera. Además, la calidad de la roca para esta estación es regular por la condición arcillosa de esta veta.

3.4.2 Roca encajante.

Cruzada Invasores Oeste.

Localizada a 146 metros desde la cruzada principal, cumple la función de conectar las dos vetas principales del lado norte del nivel 21 veta invasores y veta dolores además de que es el punto de acceso para la sobre guía ovejo. Esta cruzada mide 43 metros de longitud y aunque encuentra un despegue de la veta invasores la mayoría de este tramo está compuesta por roca sana. El peso específico de la roca fue de 2.7 t/m^3 y Su orientación es 344 con un plunge de 04.



Figura 74. Fotografía veta Invasores Oeste.

Tabla 78. Combinación de familias 1,2,3 y 4 corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|------------------------|--------------|-----|
| | | | JCS (t/m^2) | Φ_r (°) | JRC |
| 1 | 88 | 020 | 10000 | 30 | 10 |

| | | | | | |
|---|----|-----|-------|----|----|
| 2 | 75 | 306 | 10000 | 30 | 10 |
| 3 | 82 | 180 | 10000 | 30 | 10 |
| 4 | 73 | 002 | 10000 | 30 | 10 |

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

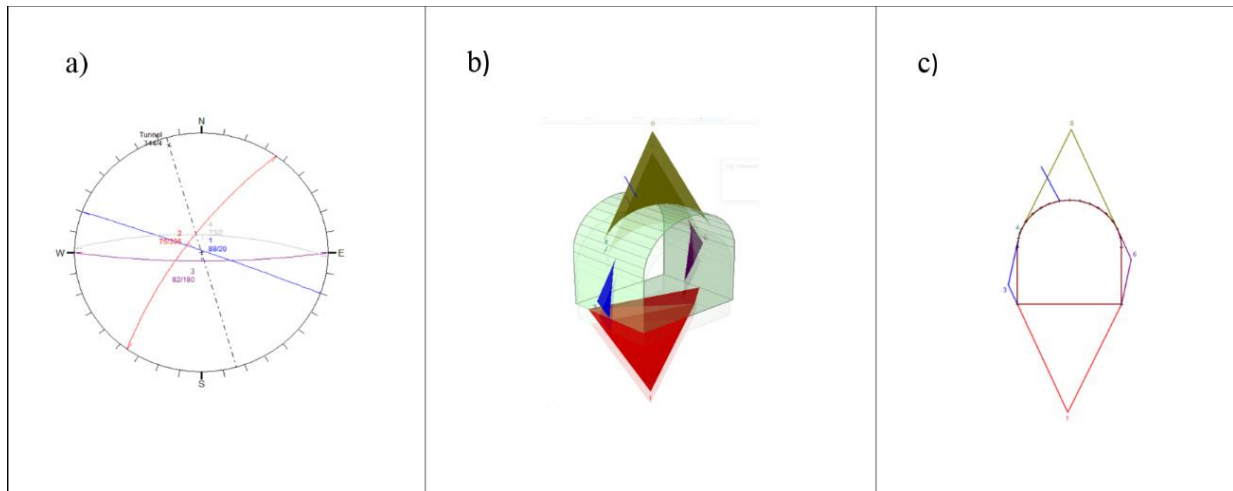


Figura 75. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 79. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| piso | 1 | 0.936 | 2.528 | estable | estable | N/A |
| Pared inferior izquierda | 3 | 0.011 | 0.031 | 126.3 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 4 | 0.000 | 0.000 | 372.1 | N/A | N/A |
| techo | 8 | 0.292 | 0.787 | 0.000 | 10.25 | N/A |
| Pared derecha | 6 | 0.014 | 0.039 | 100.5 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

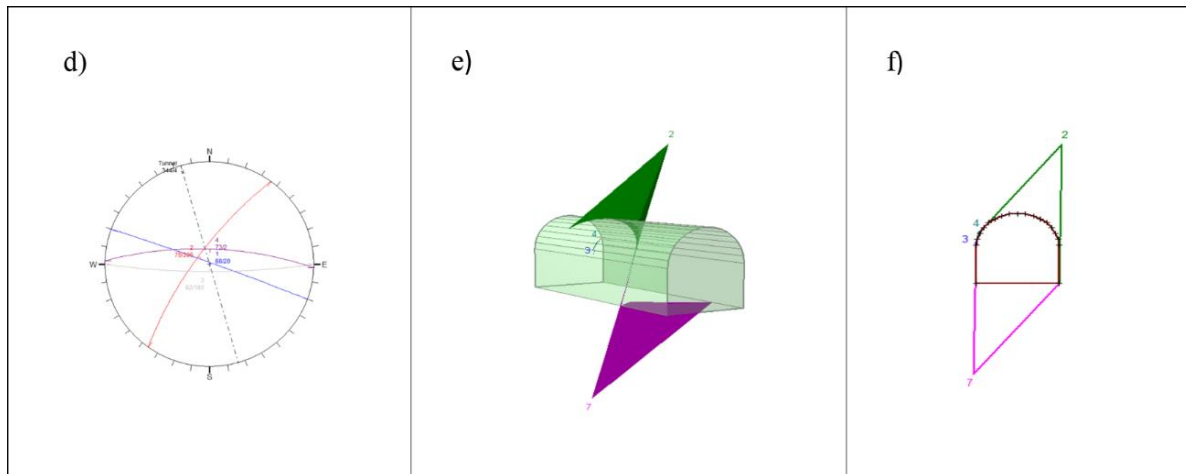


Figura 76. (d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.

Tabla 80. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 7 | 1.121 | 3.028 | estable | N/A | N/A |
| Pared inferior izquierda | 3 | 0.00 | 0.000 | 582.36 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 4 | 0.000 | 0.000 | 597.11 | N/A | N/A |
| Techo | 2 | 0.614 | 1.659 | 8.849 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

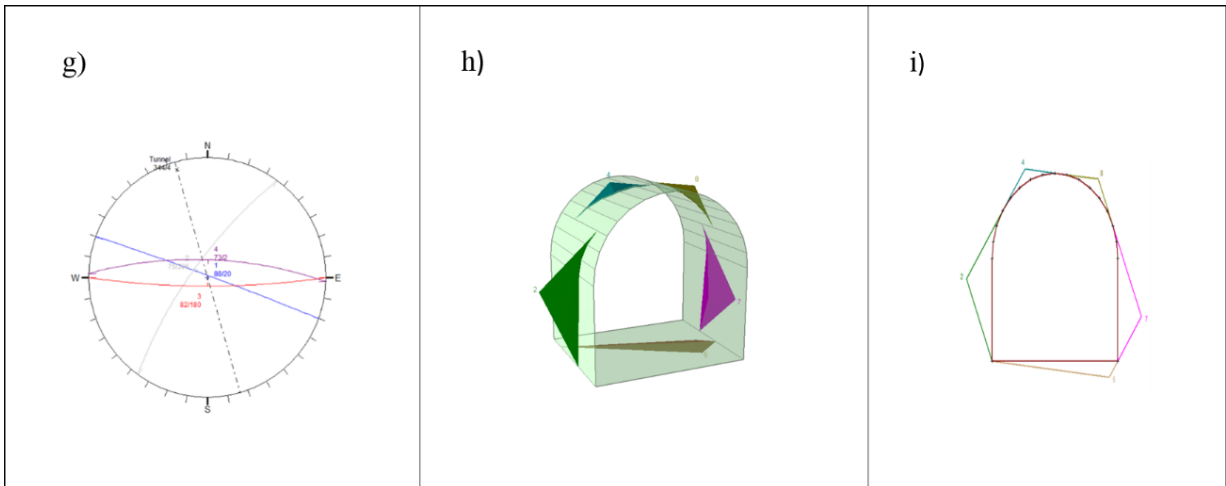


Figura 77. (g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.

Tabla 81. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| piso | 5 | 0.011 | 0.029 | estable | N/A | N/A |
| Pared inferior izquierda | 2 | 0.035 | 0.096 | 110.71 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 4 | 0.002 | 0.006 | 95.149 | N/A | N/A |
| Pared superior derecha | 8 | 0.002 | 0.006 | 0.00 | Remover | N/A |
| Pared inferior derecha | 7 | 0.027 | 0.027 | 129.46 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

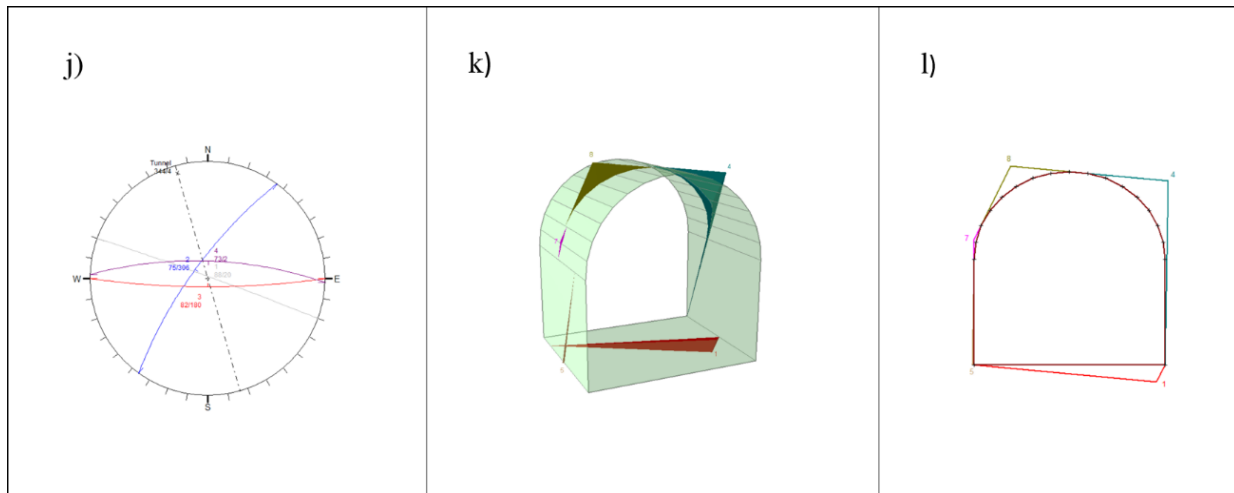


Figura 78. (j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/344. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.

Tabla 82. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| piso | 1 | 0.032 | 0.032 | estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 0.000 | 0.000 | 224.10 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 8 | 0.008 | 0.020 | 0.000 | Remover | N/A |
| Pared superior derecha | 4 | 0.022 | 0.022 | 29.973 | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

Esta parte de la mina por localizarse en medio de dos vetas principales y tener una calidad de roca RMR de 68 (buena) y un valor del sistema Q de 4.44 (regular), por lo que se recomienda colocar pernos de forma ocasional y remoción de cuñas mediante el proceso de desabombe. La cuña que se forma y que representa peligro para la operación minera se da por las familias 1,2 y 3 en la parte superior de la excavación. Las demás combinaciones no representan riesgo ya que la calidad de la roca es buena y su Angulo $\phi_r = 30$ es alto.

Guía paralela a veta Santa Inés.

Esta guía queda al sur del nivel 21 al costado izquierdo de la cruzada principal con una longitud de 260 metros. Todo este tramo se encuentra con pernos ocasionales ya que esta excavación esta sobre roca sana y paralela a la veta santa Inés. El peso específico de la roca fue de 2.45 t/m^3 y La orientación de la excavación es 105 y un plunge 04 grados.



Figura 79. Fotografía de la guía paralela a veta Santa Inés.

Tabla 83. Combinación de familias 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden al siguiente conjunto de familias estructurales:

| Familia | Dip(°) | Dip direction(°) | Parámetros | | |
|---------|--------|------------------|-------------------------|--------------|-----|
| | | | JCS (t/m ²) | Φ_r (°) | JRC |
| 1 | 61 | 151 | 10000 | 30 | 10 |
| 2 | 75 | 055 | 10000 | 30 | 10 |
| 3 | 83 | 217 | 10000 | 30 | 10 |
| 4 | 63 | 219 | 10000 | 30 | 10 |
| 5 | 52 | 012 | 10000 | 30 | 10 |

El análisis de cuñas de estas familias arroja estos resultados:

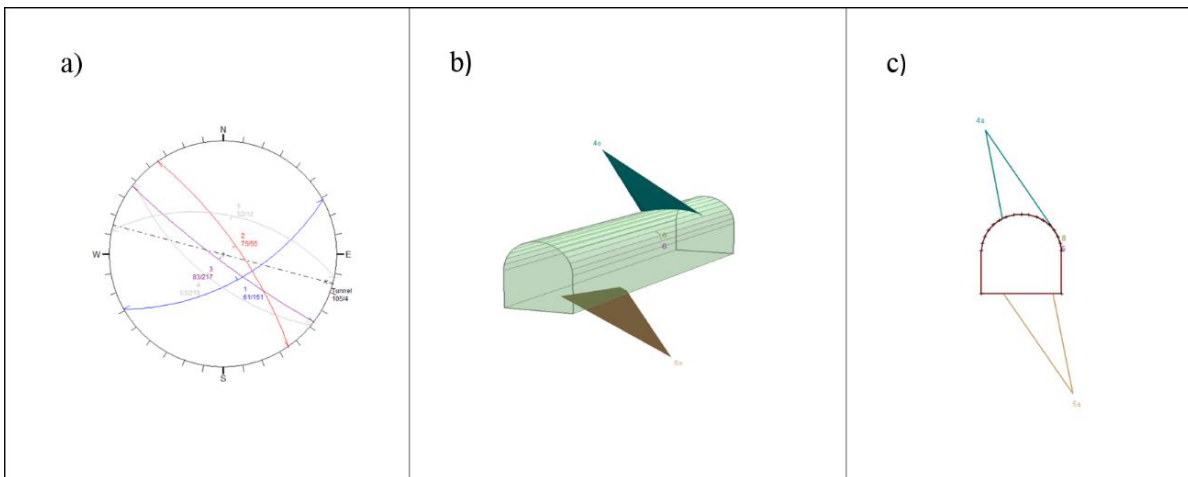


Figura 80. (a) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 3 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (b) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (c) Estabilización de cuñas.

Tabla 84. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| techo | 4 | 0.675 | 1.653 | 5.423 | N/A | N/A |
| Pared derecha | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | Remove | N/A |
| Pared derecha | 6 | 0.000 | 0.000 | 0.736 | Remove | N/A |
| piso | 5 | 1.098 | 1.298 | estable | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

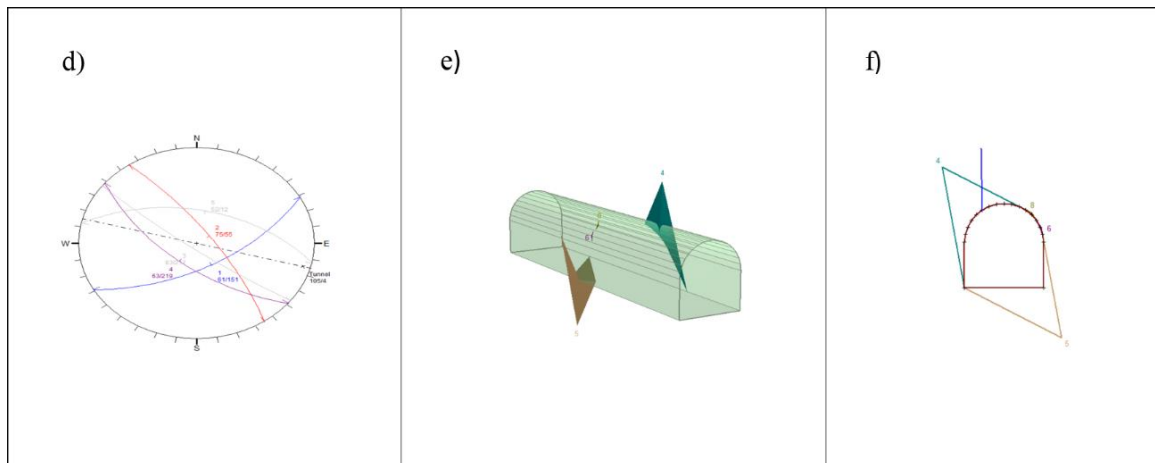


Figura 81. (d) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (e) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (f) Estabilización de cuñas.

Tabla 85. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| techo | 4 | 1.168 | 2.862 | 1.523 | 8.92 | N/A |
| Pared derecha | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Remover | N/A |
| Pared derecha | 6 | 0.000 | 0.000 | 0.736 | Remover | N/A |
| piso | 5 | 1.354 | 3.318 | estable | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

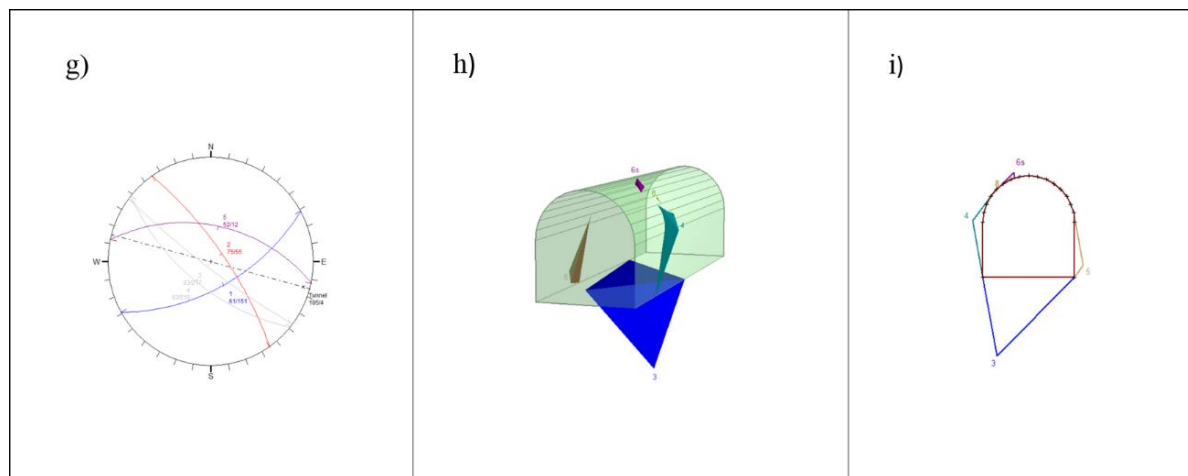


Figura 82.(g) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 2 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (h) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (i) Estabilización de cuñas.

Tabla 86. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---|-------|-------|------|-----|-----|-------|---|-------|-------|-------|---------|-----|-------|---|-------|-------|-------|---------|-----|
| piso | 3 | 4.042 | 9.903 | estable | N/A | N/A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pared derecha | 4 | 0.076 | 0.186 | 1.52 | N/A | N/A </tr <tr> <td>Pared izquierda</td> <td>5</td> <td>0.040</td> <td>0.097</td> <td>2.14</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>techo</td> <td>6</td> <td>0.004</td> <td>0.010</td> <td>0.736</td> <td>Remover</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>techo</td> <td>8</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td>Remover</td> <td>N/A</td> </tr> | Pared izquierda | 5 | 0.040 | 0.097 | 2.14 | N/A | N/A | techo | 6 | 0.004 | 0.010 | 0.736 | Remover | N/A | techo | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Remover | N/A |
| Pared izquierda | 5 | 0.040 | 0.097 | 2.14 | N/A | N/A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| techo | 6 | 0.004 | 0.010 | 0.736 | Remover | N/A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| techo | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Remover | N/A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

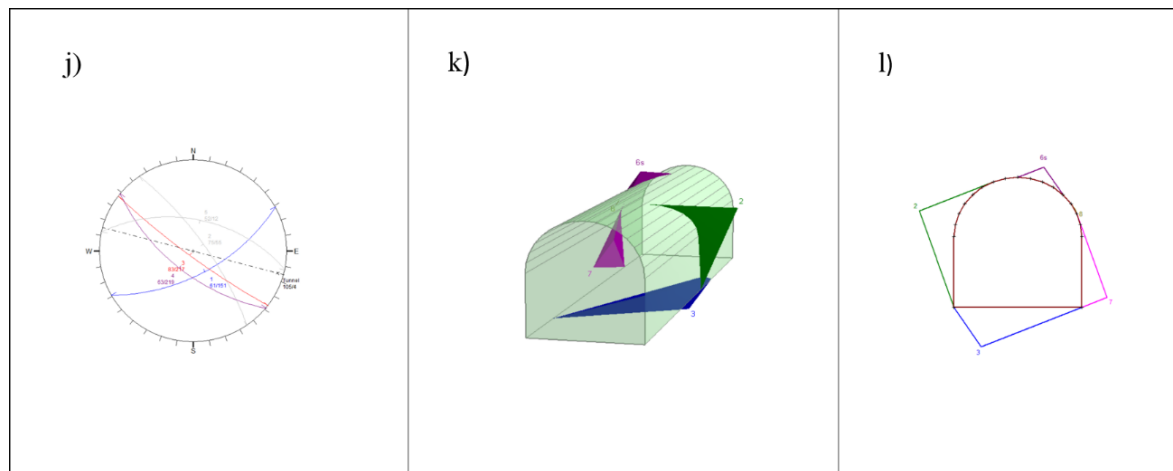


Figura 83. (j) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (k) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (l) Estabilización de cuñas.

Tabla 87. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 2 y 3.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared derecha | 2 | 0.317 | 0.777 | 1.523 | N/A | N/A |
| piso | 3 | 0.279 | 0.683 | estable | N/A | N/A |
| techo | 6 | 0.015 | 0.038 | 0.337 | Remove | N/A |
| Pared inferior izquierda | 7 | 0.115 | 0.281 | 161.62 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Remove | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

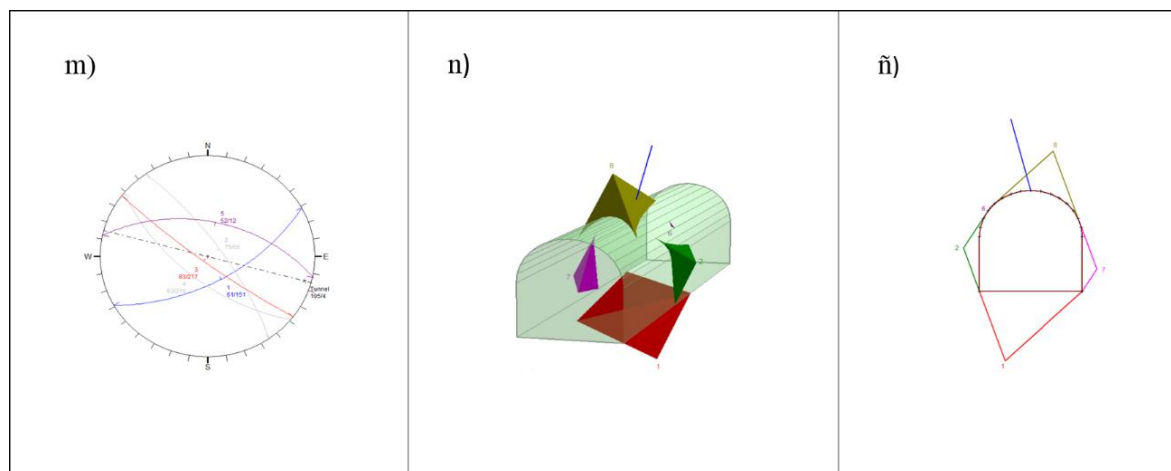


Figura 84. (m) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 1, 3 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (n) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (ñ) Estabilización de cuñas.

Tabla 88. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 1, 3 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|--------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| piso | 1 | 4.860 | 11.90 | estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 2 | 0.229 | 0.562 | 1.523 | N/A | N/A |
| Pared superior izquierda | 6 | 0.000 | 0.000 | 0.337 | Remover | N/A |
| Pared derecha | 7 | 0.173 | 0.424 | 2.147 | N/A | N/A |
| techo | 8 | 1.033 | 2.531 | 0.000 | 3.701 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

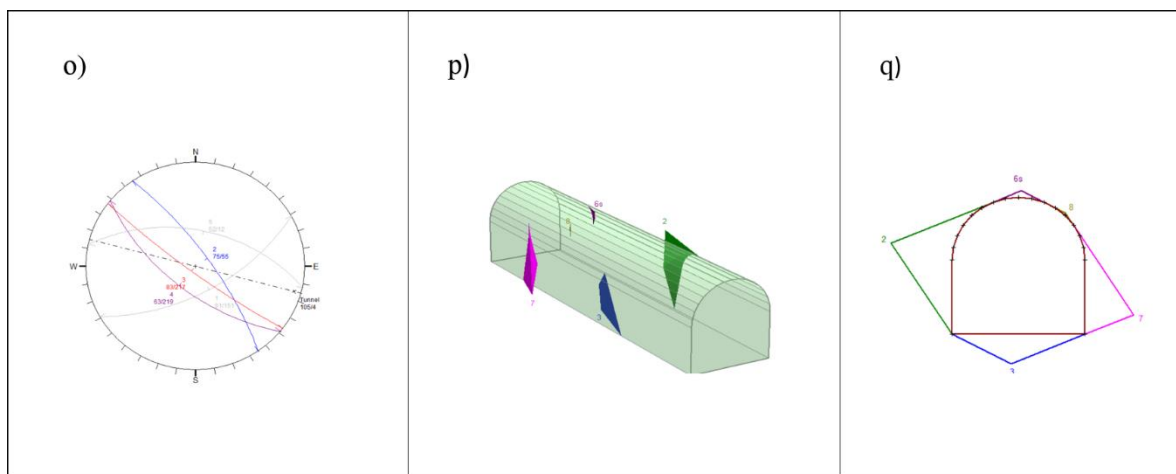


Figura 85. (o) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 4 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (p) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (q) Estabilización de cuñas.

Tabla 89. Características de las cuñas formadas la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 4.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared derecha | 2 | 0.443 | 1.060 | 13.394 | N/A | N/A |
| Piso | 3 | 0.153 | 0.375 | Estable | N/A | N/A |
| Techo | 6 | 0.002 | 0.006 | 0.337 | Remover | N/A |
| Pared izquierda | 7 | 0.212 | 0.520 | 159.84 | N/A | N/A |
| techo | 8 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | Remover | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

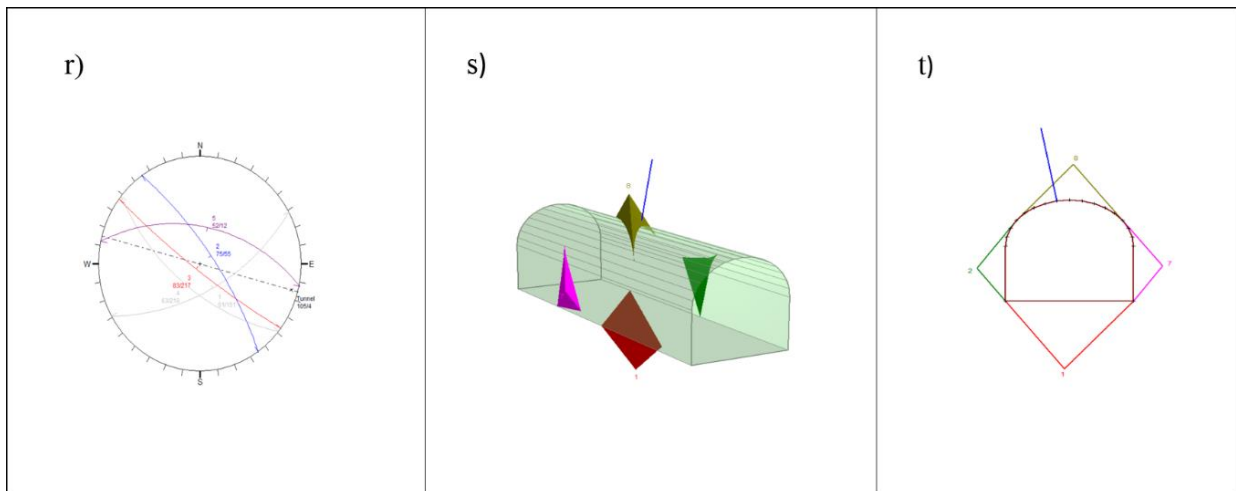


Figura 86. (r) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 3 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (s) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (t) Estabilización de cuñas.

Tabla 90. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 3 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 2.050 | 5.021 | Estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 2 | 0.223 | 0.546 | 13.780 | N/A | N/A |
| Pared derecha | 7 | 0.225 | 0.550 | 4.643 | N/A | N/A |
| techo | 8 | 0.373 | 0.913 | 0.000 | 10.630 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

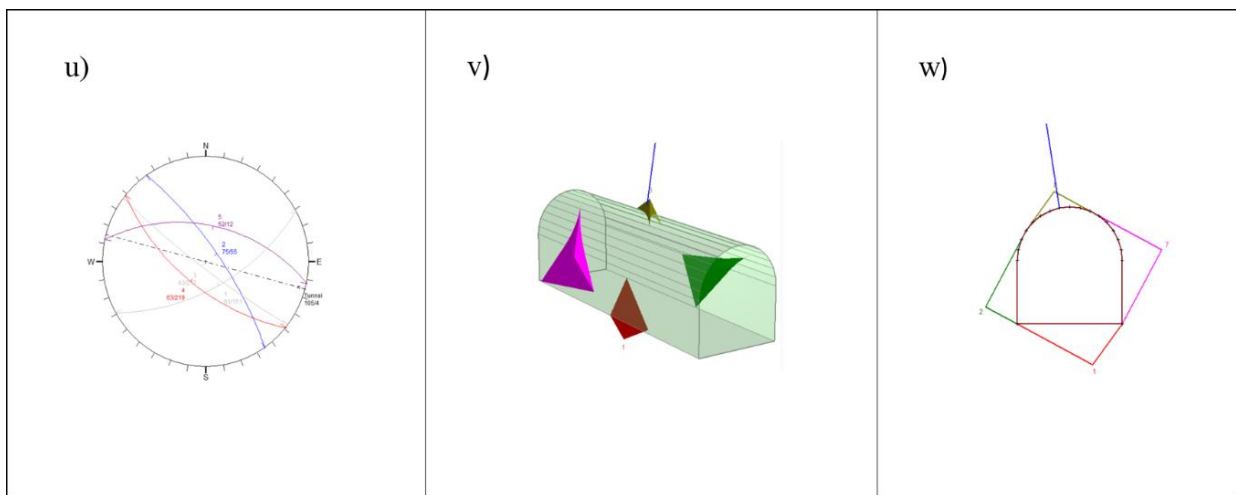


Figura 87. (u) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 2, 4 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (v) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (w) Estabilización de cuñas.

Tabla 91. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 2, 4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|-----------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Piso | 1 | 0.771 | 1.890 | Estable | N/A | N/A |
| Pared izquierda | 2 | 0.525 | 1.287 | 19.002 | N/A | N/A |
| Pared derecha | 7 | 1.031 | 2.525 | 4.643 | N/A | N/A |
| Techo | 8 | 0.077 | 0.188 | 51.618 | 10.630 | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

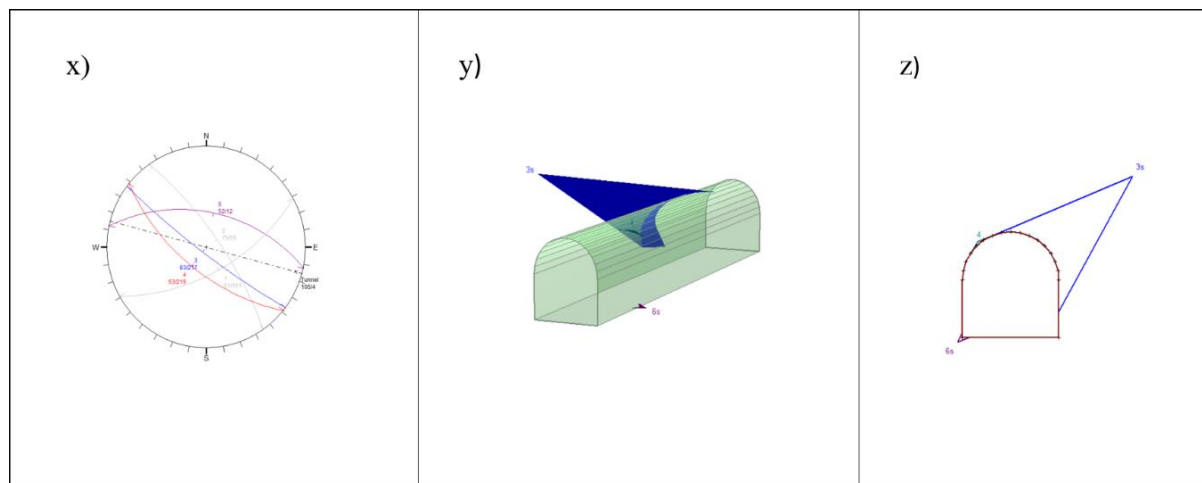


Figura 88. (x) Representación estereográfica de los conjuntos de discontinuidades 3, 4 y 5 en el trazado del túnel con dirección 04/105. (y) Cuñas formadas en el contorno de la excavación. (z) Estabilización de cuñas.

Tabla 92. Características de las cuñas formadas para la combinación de las familias estructurales 3, 4 y 5.

| Ubicación cuña | # | Volumen (m ³) | Peso (ton) | FS sin soporte | FS con pernos de 2 m | Malla con pernos |
|------------------------|---|---------------------------|------------|----------------|----------------------|------------------|
| Pared izquierda | 3 | 2.061 | 5.050 | 12.213 | N/A | N/A |
| Techo | 4 | 0.001 | 0.002 | 0.337 | N/A | N/A |
| Pared inferior derecha | 6 | 0.001 | 0.002 | estable | N/A | N/A |

Fuente: Elaboración propia.

Las cuñas presentes en esta estación indican factores de seguridad buenos, esto se debe a que la excavación está en el macizo rocoso y no cuenta con filtraciones de agua, no obstante, las cuñas que se forman en la parte superior de la excavación son de tamaños importantes porque se recomienda poner pernos aleatorios y realizar un desabombe de las cuñas pequeñas. Las combinaciones de diaclasas que forman cuñas son: 2,4,5; 2,3,5; 1,3,5; 1,2,4 y la calidad de la roca para esta excavación en sistema Q fue de 17.78 (buena) y de RMR es de 69(buena) por lo que se trabajó con $\phi_r = 30$.

Enseguida, se muestran las tablas resumen de la calidad del macizo rocoso y el sostenimiento recomendado según las directrices de los sistemas de clasificación RMR y Q. Se presenta de forma independiente para las zonas mineralizadas y la roca caja.

Tabla 93. Resumen de la calidad del macizo rocoso y su respectivo sostenimiento según el sistema RMR y Q para zonas mineralizadas.

| Ambiente geotécnico | RMR | | Q | |
|------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------|
| | puntaje | sostenimiento | puntaje | sostenimiento |
| Zonas mineralizadas | | | | |
| Veta Invasores Este | 59,1 | Excavación superior y blanqueo, avance superior de 1 a 1,5 m en el techo. Iniciar el sostenimiento después de cada voladura. Culminar el sostenimiento a 10 m del frente. Pernos sistemáticos de 4 m de long. Espaciamiento entre 1,5-2 m en el techo y paredes con malla metálica en el techo. | 0,8 | No soportes o pernos localizados |
| Veta Invasores Norte | 34 | Excavación superior y blanqueo, avance superior de 0,5 a 1,5m en el techo. Instalación de sostenimiento junto con la excavación a 10 m del frente. Cerchas ligeras con espaciado de 1,5 m donde se requiera. | 9,2 | Refuerzo en arcos de acero más pernos. Sfr(E1000) +RRS 1+ B |
| Veta Mellizos | 51 | Excavación superior y blanqueo, avance superior de 1 a 1,5m en el techo. Iniciar el sostenimiento después de cada voladura. Culminar el sostenimiento a 10m del frente. Pernos sistemáticos de 4m de long. Espaciamiento entre 1,5-2m en el techo y paredes con malla metálica en el techo. | 20 | No soportes o pernos localizados |
| Veta Ovejo | 49 | | 1,42 | sistema de pernos, hormigón lanzado de 5-6 cm, B+Sfr. |
| Veta 2511 (estación 7) | 67 | A frente completo, avance de 1 a 1,5 m. Instalar el sostenimiento a 20 m del frente. Localmente pernos de 3 m de long. Instalados en el techo con espaciado de 2,5m ocasionalmente con malla metálica. | 2,93 | sistema de pernos, hormigón lanzado de 5-6 cm, B+Sfr. |
| Veta 2511 (estación 8) | 65 | | 3,75 | |
| Veta Dolores | 40 | Galerías múltiples de avance superior de 0.5 a 1.5vm. Instalar sostenimiento junto con la excavación. Aplicación de shotcrete lo más prosible después de la voladura. Cerchas medias a espaciadas 0,75 m con revestimiento de acero y estacas de | 1,82 | Refuerzo en arcos de acero más pernos. Sfr(E1000) +RRS 1+ B |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 94. Resumen de la calidad del macizo rocoso y su respectivo sostenimiento según el sistema RMR y Q para roca encajante.

| Ambiente geotécnico | RMR | | Q | |
|--------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------|
| | puntaje | sostenimiento | puntaje | sostenimiento |
| Roca caja | | | | |
| Cruzada Invasores | 68 | A frente completo, avance de 1 a 1,5 m. Instalar el sostenimiento a 20 m del frente. | 4,44 | sistema de pernos, hormigón lanzado de 5-6 cm, B+Sfr. |
| Guia Paralela Santa Ines | 69 | Localmente pernos de 3 m de long. Instalados en el techo con espaciado de 2,5 m ocasionalmete con malla metálica. | 17,78 | No soportes o pernos localizados |
| Veta Ovejo | 66 | | 30 | No soportes o pernos localizados |

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

La alteración hidrotermal es un proceso endógeno que produce cambios complejos en las propiedades de la roca preexistente (físicos) y cambios químicos que se encuentran en función de la composición mineralógica, lo que se traduce en variaciones geomecánicas que afectan de forma desfavorable la calidad del macizo rocoso.

Para la clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel 21 de la mina La Maruja, además de los parámetros propuestos por Bieniawski (1989) y Barton et al. (1974) se tuvieron en cuenta las características geológicas de tipo de depósito, zonas del depósito (basadas en la concentración de Au) y sobre todo los tipos de alteraciones hidrotermales dominantes.

El macizo rocoso de la mina La Maruja fue afectado en su totalidad por la alteración propilítica evidenciada en campo por la presencia de colores verdosos en la roca, producto de los nuevos minerales formados como la epidota y la clorita; los cuales son minerales índices para asociar dicha alteración. Posteriormente ocurrieron dos alteraciones sobreimpuestas: una alteración argílica caracterizada por la presencia de esmectita-illita y una alteración argílica de sericita y montmorillonita, con presencia de montmorillonita en menor proporción.

De acuerdo con Ale Véliz (2012, p. 32): “La alteración de la roca en la clasificación RMR tiene un efecto en los parámetros correspondientes a la dureza de la roca intacta y la condición de la discontinuidad”. En tanto que la clasificación del Sistema Q, por su parte:

considera la alteración de la roca dentro del factor de reducción por alteración J_a de una manera directa. Indirectamente la alteración de la roca afecta a la clasificación del macizo rocoso en este sistema, en el parámetro de reducción de esfuerzos, ya que la resistencia a la compresión y a la tracción uniaxial de la roca se ve afectada bajo la influencia de la alteración (Ale Véliz, 2012, pp. 38).

La roca caja de tipo pórfido dacítico-andesítico ha sufrido dos clases de alteraciones (propilítica temprana y argílica intermedia) como respuesta mineralógica, textural y química ante la presencia de un fluido hidrotermal que asciende por medio de fisuras (como diaclasas o fallas) o poros interconectados, confirmando lo que expone Fonseca:

Aunque la composición litológica inicial tiene una influencia en la mineralogía secundaria (hidrotermal), su efecto es menor que el debido a la permeabilidad, temperatura y composición del fluido. En efecto, la temperatura del fluido y el pH de este son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal (s. f., p. 1).

La alteración hidrotermal que predomina en la roca caja es de tipo argílica, caracterizada por sericita. Si se correlaciona con la clasificación obtenida por el método RMR de Bieniawski y el Q de Barton et al. esta alteración se comporta poco pervasiva en las estaciones CB-02, CB-05 y CB-09, ya que la clasificación RMR es 'buena', 'buena' y 'buena', respectivamente. A su vez, para la clasificación Q, la alteración hidrotermal también presenta un comportamiento poco pervasivo en las mismas estaciones, ya que el resultado dio clase de 'buena', 'buena' y 'muy buena', respectivamente.

Aunque el software DIPS arrojó cinco familias de diaclasas, estas se encuentran en mejores condiciones que las de las zonas mineralizadas. En términos generales para esta zona, la condición del agua es de seco a húmedo, la alteración de la roca se encuentra de 'algo meteorizada' a 'medianamente meteorizada', persistencia de 'baja' a 'muy baja', RQD que oscila entre 75% y 100% y la resistencia a la compresión uniaxial es alta. Dado lo anterior, el resultado de estos parámetros afecta favorablemente el comportamiento geomecánico, lo cual se traduce en estabilidad para la roca encajante en el nivel 21 y, por ende, en factores de seguridad estables, ya que existe menos probabilidad del movimiento de las cuñas.

Por otra parte, en las zonas mineralizadas está presente tanto la alteración argílica caracterizada por sericita como la alteración argílica caracterizada por esmectita-illita. La interacción de estas alteraciones con la roca se ve reflejada en la clasificación geomecánica (RMR), la cual según el RMR evidencia una calidad 'buena' para las zonas alteradas argílicamente donde el mineral asociado es la esmectita y calidad de 'regular' a 'mala' en las zonas donde se desarrolló la alteración argílica de sericita. Ahora bien, para la clasificación por medio del Sistema Q no hay una relación directa entre tipo de alteración y la calidad del sector, ya que esta clasificación está entre 'muy pobre', 'pobre', 'regular' y 'buena', independiente de si la asociación de la alteración argílica es por esmectita-illita o por sericita.

En el caso de las vetas en la clasificación RMR el principal parámetro afectado con la presencia de las alteraciones hidrotermales es la resistencia a la compresión uniaxial (RCU), la cual disminuyó considerablemente con respecto a las estaciones de roca caja, principalmente en las denominadas vetas blandas (por el personal de Gran Colombia Gold Marmato).

Sumado a la alteración hidrotermal está la meteorización causada por aguas meteóricas que se infiltran a través de estas vetas, las cuales tienen continuidades de cientos de metros tanto en la vertical como en la horizontal, por lo tanto, es otro detonante en la disminución del RCU de las zonas mineralizadas. El resultado obtenido después de la caracterización en campo del parámetro *abertura* muestra que la mayoría de ellas son mayores a 5 mm, lo que aumenta la cantidad de rellenos blandos. En síntesis, la calidad de la roca en las zonas mineralizadas es menor que la calidad de la roca en las zonas de roca caja.

Después del análisis de los datos tomados en campo, la clasificación del macizo rocoso por medio de las metodologías RMR y Q, el análisis de cuñas y de las características geológicas del depósito, se puede entrar a tratar con detalle las recomendaciones de estabilidad y soporte. Cabe resaltar que el sostenimiento que se propone en las vetas del nivel 21 dependerá del tipo de veta y las condiciones específicas de las diaclasas en el tramo de excavación.

Para el caso específico de las vetas blandas como la veta Invasores Norte y la veta Dolores, los sostenimientos deben ser más robustos como arcos o puertas de acero con hastiales de madera, puesto que estas vetas se encuentran muy fracturadas y altamente meteorizadas con presencia de arcillas como la caolinita, esmectita y sericita. Por consiguiente, este tipo de estructuras son peligrosas para las operaciones mineras.

Por otro lado, las demás vetas –2511, Mellizos, Invasores Este y Ovejo– presentan mejor calidad y por ende estabilidad. Para estas vetas se recomienda colocar pernos en cuñas específicas y malla con pernos en algunos tramos. No obstante, estas estructuras no son homogéneas a lo largo de la veta, de modo que existirán tramos que deberán ser sostenidos con arcos y hastiales en madera para tener factores de seguridad aceptables.

Después de realizar el análisis cinemático de cuñas por medio del software Unwedge, el sostenimiento recomendado para la roca encajante estará compuesto por pernos en cuñas

localizadas y pernos con malla para zonas con mayor densidad de diaclasamiento, lo que genera mayor estabilidad en la excavación.

Aparte, existirán zonas donde hay cataclasis, producto de los esfuerzos estructurales de la zona, por lo tanto, se recomienda colocar arcos para mejorar los factores de seguridad de estos segmentos.

Finalmente, se muestra una tabla resumen de los soportes recomendados por cada una de las metodologías, teniendo en cuenta la calidad obtenida. Dicho sostenimiento se ajustó a las necesidades específicas de los segmentos analizados en el nivel 21 de la mina La Maruja realizado por los autores de este trabajo de grado.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se realizó una clasificación geomecánica en el nivel 21 de la mina La Maruja, en el distrito minero de Marmato, Caldas y un análisis de cuñas con el fin de estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte; asimismo, se realizó una evaluación del efecto de las alteraciones hidrotermales para correlacionar los resultados obtenidos de la clasificación geomecánica realizada en roca sana con las obtenidas en los sectores con presencia de alteración hidrotermal.
- Este trabajo se enfocó en dos ambientes geotécnicos importantes, a saber: roca caja y zonas mineralizadas. La roca encajante presenta mejor calidad debido a que la alteración hidrotermal tuvo un comportamiento poco pervasivo en estas zonas. En contraste, las zonas mineralizadas presentan menor calidad, ya que reciben de forma directa los fluidos mineralizantes.
- La clasificación RMR y Q son de las clasificaciones más empleadas para la clasificación geomecánica en excavaciones, por ende, es importante la utilización de ambas metodologías, dado que, por la diferencia entre sus parámetros se complementan y permiten reducir el margen de error para la clasificación de un macizo rocoso. El RMR evalúa a mayor profundidad las discontinuidades mientras que por su parte el Q las analiza de manera superficial, siendo el SRF un parámetro a distinguir con respecto al RMR. Dado lo anterior, agregar el RMR posibilita que se sectorice y se definan con mayor exactitud y, por ende, una mejor clasificación.
- Los datos obtenidos según la metodología RMR para roca encajante varían entre 66 y 69 lo que equivale a una calidad buena. Por otra parte, el RMR en las zonas mineralizadas la calidad del macizo rocoso tiene una relación directa con el tipo de alteración argílica, siendo de menor calidad las vetas afectadas por la alteración argílica caracterizada por sericita mientras que en las zonas de mayor calidad el mineral índice es la esmectita.
- El resultado de la clasificación geomecánica por medio del método RMR es el siguiente: i) Clasificación *buena* para las estaciones CB-02, CB-05, CB-07, CB-08 y CB-09 ii) clasificación *regular* para las estaciones CB-01, CB-04 y CB-06 iii)

- clasificación *mala* para las estaciones CB-03 y CB-10. Ahora bien, el resultado para la clasificación geomecánica por medio del Sistema Q es la siguiente: i) clasificación *muy buena* para la estación CB-09 ii) clasificación *buena* para las estaciones CB-02, CB-05, CB-07 y CB-08 iii) clasificación *regular* para las estaciones CB-03 y CB-04 iv) clasificación *pobre* para las estaciones CB-01, CB-06 y CB-10
- Para el caso de roca caja predomina la alteración hidrotermal argílica, caracterizada por sericita. Al correlacionarlo con la clasificación obtenida por el método RMR y Q, esta alteración se comporta de forma poco pervasiva en las estaciones CB-02, CB-05 Y CB-09 ya que la clasificación dio “buena” en las tres estaciones por el método RMR y “buena”, “buena” y “ muy buena”, en las mismas estaciones, respectivamente por el Sistema Q.
 - La resistencia a la compresión uniaxial (RCU) fue el parámetro más afectado en las zonas de veta, ya que las alteraciones hidrotermales cambian las características químicas y físicas de la roca.
 - Para roca encajante el software DIPS arrojó cinco familias de diaclasas principales (83/217, 60/187, 61/151, 87/019 y 77/055). Por otra parte, las zonas mineralizadas arrojaron cuatro familias principales de diaclasas las cuales son: 70/250, 69/063, 39/159 y 79/ 034.
 - El sostenimiento que se propuso depende del tipo de estructura, de la calidad de la roca obtenida por la metodología RMR y Q de Barton, el tipo de alteración y por último el tamaño y posición de las cuñas en la excavación.
 - Dado lo anterior, para las zonas mineralizadas en las vetas Invasores Norte y veta Dolores se recomienda colocar arcos con hastiales de madera y el desabombe de cuñas. Para las vetas Invasores Este y 2511 se recomienda pernos localizados y desabombe. Por último, veta Ovejo (estación CB-06) requiere pernos de forma sistemática y malla con pernos. Colocar uno u otro soporte dependerá de las condiciones puntuales de cada tramo ya que las características geológicas de las vetas no son homogéneas. Por otro lado, para las estaciones de roca encajante realizadas en las vetas –Santa Inés, cruzada Invasores Oeste y sobreguía Ovejo (estación CB-09)– se requiere pernos localizados de máximo 2 m y desabombe de cuñas.

5.2 Recomendaciones

- Dado a la falta de presupuesto para realizar ensayos de laboratorio, se recomienda la elaboración de ensayos de compresión simple, ya que este método es mucho más exacto y permite una mejor clasificación de la roca.
- Si Gran Colombia Gold Marmato desea tener mayor conocimiento del estado del macizo rocoso y pretende aplicar nuevas metodologías de explotación, que sean más económicas y eficientes, se recomienda realizar múltiples perforaciones en el nivel 21 y tener un conocimiento más completo del estado de la roca.

Referencias

- Ale Véliz, J. D. (2012). *Influencia de la alteración hidrotermal en la calidad del macizo rocoso en taludes de tajos abiertos* (tesis de Maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Recuperado de <http://bit.ly/2OSOjtX>
- Álvarez, A, J. (1979). Geología de la Cordillera Central y el Occidente colombiano y Petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenozoicos (tesis de Doctorado). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Recuperado de <http://bit.ly/2Esewft>
- Álvarez, E., y González, H. (1978). *Geología y Geoquímica del Cuadrángulo I-7, Urrao* [archivo PDF]. Recuperado de <http://bit.ly/2NoLKPJ>
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, And Petroleum Engineering*. Canadá: John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z.T. (1993). Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends. En J. A. Hudson (Ed.), *Rock Testing and Site Characterization, Vol. 3* (pp. 553-573). Oxford, Inglaterra: Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50028-8>
- Botero, R. J. y Zuluaga, M. C. (1980). Geoquímica y Estructura de los Depósitos de Oro de Marmato. U. Nacional de Colombia. Dpto. De Ciencias.
- Calle, B. y González, H. (1982). Geología y geoquímica de la Plancha 186, Riosucio. Informe N° I – 1878. [archivo PDF]. Recuperado de <http://bit.ly/2ErOqsT>
- Calle, B., Toussaint, J. F., Restrepo y Linares, E. (1980). Edades K/Ar de dos plutones de la parte septentrional de la Cordillera Occidental de Colombia. *Geología Norandina* 2.
- Ceballos, J. (s. f.). Geología estructural local [Mina La Maruja. Material inédito].
- Celada, B., Tardáguila, I., Rodríguez, A., Varona, P., y Bieniawski, Z.T (2014). Actualización y mejora del RMR. *Ingeopres*, (234), 18-22. Recuperado de <https://bit.ly/2E742AB>
- Cotrina, M. A. (s. f.). Mecánica de Rocas. Redes estereográficas Dips. Recuperado de <http://bit.ly/2FL6jnf>

- Deere, D.U., and D. W. Deere. (1989) "the RQD index in practice." proc. symp. rock classif. Eng. purp., ASTM Special technical publication 984, Philadelphia, pp. 91-101
- Estrada, J. J., Viana, R., González, H. (2001). *Geología de la Plancha 205, Chinchiná. Memoria explicativa escala 1:100 000* [archivo PDF]. Recuperado de <http://bit.ly/2H4bAXU>
- Fonseca, D. (s. f.). Alteración hidrotermal. *Academia.edu*. Recuperado de <http://bit.ly/2uOUWo4>
- Gaeta Tassinari, C., Díaz Pinzón, F., & Buenaventura, J. (2008). Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: A Miocene–Pliocene epizonal gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 33(3), 505-518. doi: 10.1016/j.oregeorev.2007.03.002
- Gran Colombia Gold. (2017a). *Shifting focus to Marmato's underground mining potential* [información de uso reservado].
- Gran Colombia Gold. (2017b). *NI 43-101 Technical Report Updated Mineral. Resource Estimate Marmato Project. Colombia* [información de uso reservado].
- González Iregui, H. (1976). Geología del Cuadrángulo 3-8, Sonsón. Inst. Nal. De Inv. Geológico Mineras. Inf. no. 1704.
- Grosse, E., (1926). *El Terciario Carbonífero de Antioquia. Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la cordillera Central de Colombia*. Berlín: Dietrich Reimer. Recuperado de <http://bit.ly/2Iyxoxv>
- Hoek, E. (2000). Structurally controlled instability in tunnels. En *Rock Engineering. Course notes* (pp. 73-81). s. l., s. e.
- Lozano, A. (s. f.). Martillo Schmidt (esclerómetro). *Geoengineering Services & Consulting E.I.R.L.* Recuperado de <http://bit.ly/2G4wohe>
- Melentijevic, S. (2005). Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.

- Minminas, Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio. Marmato, Riosucio, Quinchía y Caramanta*. Bogotá, Colombia: Dirección de Laboratorios, Grupo de Trabajo Cali.
- Milne, Hadjigeorgiou & Pakalnis (1998). Rock Mass Characterization for Underground Hard Rock Mines. *Tunneling and Underground Space Technology*, 13(4), 383-391. Recuperado de <http://bit.ly/2IRr6sf>
- Gaeta Tassinari, C., Díaz Pinzón, F., & Buenaventura, J. (2008). Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: A Miocene–Pliocene epizonal gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 33(3), 505-518. doi: 10.1016/j.oregeorev.2007.03.002
- Norwegian Geotechnical Institute, NGI. (2015). Using the Q-System, Rock mass classification and support design. Oslo, Noruega: NGI. Recuperado de <http://bit.ly/2HyJDc5>
- Palmstrom, A. (1982). The Volumetric joint Count-a useful and simple measure of the Degree of rock jointing. En *Proceedings 4th International Congress, International Association of Engineering Geology, India*, Vol. 5 (pp. 221-228). Recuperado de <http://bit.ly/2Wa5euw>
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Restrepo, J.J., y Toussaint, J.F. (1975). Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia Colombia: Publicación Especial Geológica, Facultad de Minas, Medellín, No 6, 24p.
- Rodríguez, J. A. (2007). Caracterización de macizos rocosos [documento de la Universidad de Oviedo, archivo PDF]. *Course Hero*. Recuperado de <http://bit.ly/2NwdfNx>
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). Memoria explicativa geomorfología Plancha 187 Salamina, departamentos de Caldas y Antioquia [en línea]. Recuperado de <http://bit.ly/2U7YLiX>
- Sierra, G.M. (1994). Structural and Sedimentary Evolution of the Irra Basin, Northern Colombia Andes (Tesis de Maestría). Binghamton University, New York.

