



**Caracterización, Zonificación Geomecánica y Recomendación del Sostenimiento
Necesario Para la Estabilidad de Labores Temporales y Permanentes del Macizo
Rocoso en el Nivel 1712 del Cuerpo Zeus de la Mina El Roble.**

Mateo Gómez Rodríguez

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES -CALDAS

Febrero 2022



**Caracterización, Zonificación Geomecánica y Recomendación del Sostenimiento
Necesario Para la Estabilidad de Labores Temporales y Permanentes del Macizo
Rocoso en el Nivel 1712 del Cuerpo Zeus de la Mina El Roble.**

Mateo Gómez Rodríguez

Informe de práctica académica presentado para optar al título de Geólogo

Director académico:

Geólogo John Jairo Cardona Ríos

Director empresarial:

Geólogo José Alejandro Muñoz Maya

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES -CALDAS

Febrero 2022



NOTA DE ACEPTACIÓN

APROBADO

John Jairo Cardona Ríos

Director de trabajo de grado



AGRADECIMIENTOS

A la empresa minera El Roble por la oportunidad de realizar mi práctica bajo las mejores condiciones laborales y en un ambiente rodeado de retos y excelentes profesionales; en especial agradezco a los geólogos Angelica Martínez, Alejandro Muñoz, Claus Gutiérrez y a todo el equipo de geomecánica por hacer de esta una de las experiencias más enriquecedoras tanto profesional como personalmente, por la confianza entregada y por demostrarme siempre su gran calidad humana.

A la planta docente de la Universidad de Caldas quienes, desde sus diversas metodologías, siempre me dejaron alguna enseñanza para mi vida profesional.

Al geólogo John Jairo Cardona por amablemente brindarme su ayuda para llevar a feliz término este informe y por demostrar siempre ser un gran profesional dispuesto a ayudar a sus alumnos.

A mis padres y mis hermanos por su esfuerzo, su paciencia, por dejar los prejuicios a un lado y estar siempre ahí para ayudarme y alentarme en cualquier circunstancia.

A Víctor Males por brindarme su apoyo incondicionalmente.

A mis amigos de toda la vida y a los amigos que hice en la Universidad, los cuales siempre me ayudaron y me brindaron las mejores experiencias, sin ellos hubiera sido más difícil cumplir el objetivo y sin lugar a dudas no me lo hubiera disfrutado tanto.



RESUMEN

En este informe se estableció el diseño de sostenimiento a ejecutar en las labores temporales y permanentes del nivel 1712 del cuerpo Zeus en la mina El Roble siguiendo los criterios de calificación internacional de macizos rocosos, *Rock Mass Rating* (RMR) y *Geological strength Index* (GSI) (Bieniawski, 1989; Hoek y Marinos, 2000), a partir de sus valores calculados al techo de los túneles de avance dentro del nivel y posteriormente aplicando el estándar de sostenimiento elaborado por el área de geomecánica de la mina; lo que igualmente permitió generar una zonificación geomecánica en la cual se identifica la distribución de tres zonas geomecánicamente diferentes dentro del nivel.

Con base en los dos criterios de clasificación mencionados, se encontraron dos tipos de macizo rocoso, los cuales, están representados por cuatro litologías presentes en el yacimiento (basalto, chert, andesita y sulfuro), que a su vez, se dividen en 9 tipos de unidades con características geomecánicas diferentes; cinco de ellas constituyen un macizo de mala calidad (RMR: 31 - 40 y GSI: IF/R - MF/R) y cuatro representan un macizo de calidad regular (RMR: 41 - 60 Y GSI: MF/R) que corresponde al macizo de mejor calidad en el nivel. Estos macizos de baja calidad hacen del nivel 1712 un nivel crítico altamente inestable, sin embargo, el diseño de sostenimiento ejecutado en cada uno de los avances permitió que la extracción de los tajos primarios se llevara a cabo de manera exitosa. Es decir, con cero accidentes por caída de roca, lo que indica que el diseño de sostenimiento de la mina el Roble funciona de manera adecuada.

Palabras clave: Geomecánica, macizo rocoso, *Rock Mass Rating* (RMR), *Geological Strength Index* (GSI), zonificación, discontinuidades.



ABSTRACT

In this report, the support design to be carried out in the temporary and permanent works of level 1712 of the Zeus body in the El Roble mine was established, following the criteria for international classification of rock masses, Rock Mass Rating (RMR) and Geological strength Index (GSI). (Bieniawski, 1989; Hoek and Marinos, 2000), based on their values calculated at the roof of the advance tunnels within the level and subsequently applying the support standard prepared by the geomechanics area of the mine; which also allowed generating a geomechanical zoning in which the distribution of three geomechanically different zones within the level is identified.

Based on the two classification criteria mentioned, two types of rock mass were found, which are represented by four lithologies present in the deposit (basalt, chert, andesite and sulfide), which in turn are divided into 9 types. of units with different geomechanical characteristics; five of them constitute a solid of poor quality (RMR: 31 - 40 and GSI: IF/R - MF/R) and four represent a solid of regular quality (RMR: 41-60 and GSI: MF/R) that corresponds to the solid of best quality in the level. These low quality massifs make level 1712 a highly unstable critical level, however, the support design executed in each of the advances allowed the extraction of the primary pits to be carried out successfully. That is to say, with zero rock fall accidents, which indicates that the El Roble mine support design works adequately.

Keywords: Geomechanics, rock mass, Rock Mass Rating (RMR), Geological Strength Index (GSI), zoning, discontinuities.



CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	JUSTIFICACIÓN.....	3
3.	OBJETIVOS	4
3.1.	Objetivo general.....	4
3.2.	Objetivos específicos.....	4
4.	METODOLOGÍA.....	5
4.1.	Etapa 1. Trabajo de campo.....	5
4.2.	Trabajo de oficina.....	6
4.2.1.	Compilación y organización de la información	6
4.2.2.	Implementación de <i>software</i>	6
4.2.3.	Análisis de las características geomecánicas del nivel 1712.....	7
4.2.4.	Elaboración del informe.....	7
5.	MARCO TEÓRICO.....	8
5.1.	Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS).....	8
5.2.	Geomecánica	10
5.2.1.	Conceptos Base	10
5.3.	Caracterización geomecánica	12
5.3.1.	Resistencia a la compresión uniaxial	12
5.3.2.	<i>Rock quality designation</i> (RQD).....	13
5.3.3.	Espaciamiento	14
5.3.4.	Condición de las discontinuidades	14
5.4.	Sistemas de clasificación geomecánica	18
5.4.1.	<i>Rock Mass Rating</i> (RMR)	18
5.4.2.	<i>Geological strength Index</i> (GSI).....	20



5.5.	Sistema de sostenimiento	21
5.5.1.	Elementos de sostenimiento	21
5.6.	Estándar de sostenimiento de la mina El Roble	25
6.	MÉTODO DE EXPLOTACIÓN O MINADO	27
6.1.	Corte y relleno en cámaras y pilares (ascendente)	27
6.1.2.	Aspectos importantes del método de minado.....	30
6.2.	Ciclo de minado.	30
7.	MARCO GEOLÓGICO	32
7.1.	Estratigrafía regional.....	32
7.1.1.	Formación Barroso.....	32
7.1.2.	Formación Penderisco.....	32
7.2.	Geología local.....	34
7.2.1.	Basaltos (Kv)	35
7.2.2.	Chert (Kbc y Kgc).....	36
7.2.3.	Sulfuro Masivo (MS)	37
7.2.4.	Secuencia sedimentaria (SS).....	37
7.2.5.	Diques andesíticos.....	38
7.3.	Mineralización	39
7.4.	Alteración.....	40
7.5.	Tipo de depósito.....	40
7.6.	Geología Estructural.....	41
7.6.2.	Estructuras Locales	44
7.7.	Geología económica.....	48
8.	EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 1712.....	49
8.1.	Mapeo geomecánico.....	49



8.2	Análisis estructural del macizo rocoso.....	50
8.3	Caracterización RMR del macizo rocoso	53
8.3.1.	Litología.....	53
8.3.2.	Resistencia	53
8.3.3.	RQD	54
8.3.4.	Espaciamiento de las discontinuidades.....	56
8.3.5.	Condición de las discontinuidades	58
8.3.6.	Agua subterránea	61
8.4	Calculo del RMR	62
8.5	Clasificación de las rocas según el criterio GSI	67
8.6	Recomendaciones de sostenimiento	69
8.6.1.	Labores permanentes	71
8.6.2.	Labores temporales	73
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	80
9.1.	Estabilidad por orientación de las discontinuidades.....	80
9.1.1.	Análisis de cuñas.....	82
9.2	Clasificación RMR y GSI de los macizos rocosos en el nivel 1712.....	84
9.3.	Recomendaciones de sostenimiento para las labores del nivel 1712.....	86
9.4.	Zonificación geomecánica del nivel 1712	89
10.	RECOMENDACIONES	91
10.1.	Recomendaciones generales	91
10.2.	Recomendaciones para la extracción de tajos secundarios	92
11.	CONCLUSIONES	94
12.	REFERENCIAS.....	96
13.	ANEXOS.....	103



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización título minero El Roble (Fuente propia).	1
Figura 2. Modelo genético para la formación de depósitos tipo VMS, modificado de Galley, (1993) y Franklin, (1995) por Franklin et al. (2005).....	9
Figura 3. Sistema de discontinuidades con 3 sets de diaclasas en un macizo muy fracturado con formación de bloques de roca (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).	11
Figura 4. Método de medición directo para el cálculo del RQD en testigos de perforación (Zhang, 2016)	14
Figura 5. Espaciamiento (flechas naranjas) y persistencia (líneas negras) medidos en un macizo de sulfuro (Fuente propia).	15
Figura 6. Muestra de Chert negro de la Mina El Roble con aberturas de 1 a 5mm (flechas azules) y rellenos duros de composición calcárea. Modificado de (Espinal-Corrales, 2020)	16
Figura 7. Rugosidad presente en sulfuro, las flechas azules marcan las zonas con diferentes tipos de rugosidad (Fuente propia).....	16
Figura 8. Zona de contacto (línea punteada negra) entre basalto y chert negro (Fuente propia). 17	
Figura 9. Formato de clasificación RMR de Minera El Roble S.A (Modificado de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía del Perú por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble, 2017).....	19
Figura 10. Carta de clasificación GSI para macizos rocosos (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).	20
Figura 11. Elementos de sostenimiento A) Shotcrete, B) Malla electrosoldada, C) Perno Helicoidal, D) Split set, E) sistema de sostenimiento integrado por estos 4 elementos (Fuente propia)	23
Figura 12. Cimbras de sostenimiento A) Tipos de cimbras (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004). B) Instalación de Cimbras tipo baúl en la mina El Roble en el nivel 1872 (Fuente propia).	24

Figura 13. Estándar de sostenimiento para labores mineras permanentes (Modificada de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004 por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble,2017).	26
Figura 14. Estándar de sostenimiento para labores mineras temporales permanentes (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017).	26
Figura 15. Esquema de explotación de niveles en el cuerpo Zeus, paneles primarios (PS) y secundarios (SS) (Kelly, 2021).....	28
Figura 16. Apertura del nivel de explotación A) Ventana de acceso al nivel, B) Galería de acceso a las labores de explotación. (Departamento de Planeamiento Minero de la Mina El Roble, 2017).....	29
Figura 17. Secuencia de Minado en paneles: Se procede con la explotación del tajo uno, una vez finalizada se rellena y de igual forma se procede con el tajo dos y por último el tres (S.R.L.tda, 2017).	29
Figura 18. Método de minado aplicado al cuerpo Zeus. A) Paneles con sus tajos primarios. B) Paneles con sus tajos primarios y secundarios. (Departamento de Planeamiento Minero de la mina El Roble, 2017).....	30
Figura 19. Ciclo de minado para la mina El Roble. (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble, 2017).....	31
Figura 20. Mapa geológico regional, el rectángulo rojo encierra la extensión del título minero El Roble, modificado de Calle y Salinas, 1986.....	33
Figura 21. Geología local del yacimiento El Roble modificado de Kelly (2018) (Original sin escala).....	35
Figura 22. Basalto (MB, nomenclatura utilizada por el área de geomecánica). A) basalto. B) basalto con tonalidad verdosa producto de minerales de alteración (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble).....	36
Figura 23. Cher gris (MK, nomenclatura utilizada por el área de geomecánica). A) chert gris masivo. B) chert gris laminado (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble)....	36
Figura 24. Sulfuro semi-masivo (MM, nomenclatura utilizada por el área de geomecánica) (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble)	37
Figura 25. Intrusión de dique andesítico en un macizo de sulfuro (Fuente propia).	38



Figura 26. Testigos de perforación del pozo ATDHR-04, a 6.5% Cu y 17.6 g/t Au en el cuerpo de sulfuros masivos “Maximus”. (Echeverri y Salas, 2017).....	39
Figura 27. Modelo VMS idealizado del depósito de la mina El Roble (Espinal-Corrales 2020).	40
Figura 28. Distribución de cuerpos de sulfuros masivos. Las líneas blancas corresponden a las perforaciones históricas realizadas por Miner S.A para la delimitación de los cuerpos de sulfuro, las líneas verdes marcan el trazo de los sectores desde donde se han realizado dichas perforaciones (Kelly 2021).....	41
Figura 29. Fallas de carácter regional con influencia sobre el yacimiento de la mina El Roble (Modificado del modificado por Espinal-Corrales (2020) de Calle y Salinas (1986).....	43
Figura 30. Fallas al interior de la mina A) Superficies estriadas. B) Falla de carácter inverso de alto ángulo desplazando dos bloques de sulfuro. C) Falla normal de bajo ángulo en zona de contacto entre el sulfuro y el chert negro (Fuente propia).....	45
Figura 31. Zona de cizalla con pliegues asimétricos y blastos de sulfuro embebidos en rocas de chert negro, uno de los blastos deformados exhibe un movimiento sinistral (Fuente propia)	46
Figura 32. Zona de contacto fallado entre sulfuro y chert negro, en la cual se aprecia una estructura pinch and swell en el sulfuro. (Fuente propia).	47
Figura 33. Diaclasamiento A) Macizo intensamente fracturado. B) Macizo con control estructural de dos familias de diaclasas que forman bloques de gran tamaño (Fuente propia).	48
Figura 34. Mapeo estructural del nivel 1712, escala 1:600. Se observan las diferentes labores, datos estructurales (color azul) y la traza de contacto (línea rosa) (Departamento de geomecánica de la Mina El Roble).....	50
Figura 35. Diagramas estadísticos generados en el software Dips. A) Diagrama de roseta, donde se puede observar la tendencia general de las estructuras. B) Diagrama de contornos con las 5 familias de discontinuidades en color rojo. C) planos principales de las 5 familias de discontinuidades. D) Diagrama de polos correspondientes a los 542 datos estructurales tomados para las discontinuidades presentes en el nivel 1712 de la mina El Roble.	52
Figura 36. Puntaje o Rating según el valor del RQD. A) Basalto (línea gris), B) Chert (línea roja), C) sulfuro (línea amarilla) D) dique (line azul), modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotécnia - CCGG, 2018.....	56

- Figura 37.** Gráfico para determinar el espaciamiento en mm. A) Basalto (línea gris), B) Chert (línea roja), C) sulfuro (línea amarilla) D) dique (línea azul), modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotécnia - CCGG, 2018.57
- Figura 38.** Partes de un túnel, sobre las cuales se delimita la instalación de los diferentes elementos de sostenimiento (Fuente propia).70
- Figura 39.** Ventana de acceso al nivel 1712, escala 1: 200. Los cambios de color corresponden a los indicados para la zonificación geomecánica. La línea verde marca el contacto entre el Basalto y el Chert negro. Modificado del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble.71
- Figura 40.** Tabla GSI para labores permanentes. Las flechas y el área delimitada en color azul indican el tipo de macizo; las líneas continuas definen a partir del RMR el tipo de sostenimiento. Los colores que corresponden a cada roca son: gris – basalto, amarillo – sulfuro, café – chert negro. (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble 2017). 73
- Figura 41.** Tabla GSI para labores temporales, aplicada a las galerías. Las flechas y las áreas delimitadas en color azul indican el tipo de macizo; las líneas continuas definen a partir del RMR el tipo de sostenimiento. Los colores que corresponden a cada roca son: amarillo – sulfuro y azul – dique (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble, 2017).....76
- Figura 42.** Tabla GSI para labores temporales, aplicada a los tajos. Las flechas y las áreas delimitadas en color azul indican el tipo de macizo; las líneas continuas definen a partir del RMR el tipo de sostenimiento. Los colores que corresponden a cada roca son: amarillo – sulfuro, café – chert negro y azul claro - dique. (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble, 2017).....78
- Figura 43.** Estabilidad por orientación de las juntas. A) Condición favorable; B) Condición desfavorable (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004).80
- Figura 44.** Formación de cuñas entre las cinco familias de discontinuidades, la línea de intersección entre planos es representada estereográficamente por un punto que se encuentra en color naranja.83

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Resistencia estimada de la roca con base en golpes de picota (S.R.L.tda, 2017).	13
Tabla 2. Datos estructurales representativos de las 5 familias de discontinuidades (Fuente propia).	52
Tabla 3. Tabla con valores Rating para clasificación RMR según valores de resistencia de la roca. Modificado de Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.	54
Tabla 4. Resistencia de las diferentes litologías en el nivel 1712 (Modificado de Gutierrez-Hernandez, 2019).	54
Tabla 5. Relación del número de fracturas con el RQD. (Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018).....	55
Tabla 6. Resultados de RQD determinados para las diferentes litologías del nivel 1712 modificado de Gutierrez-Hernandez, 2019.	55
Tabla 7. Resultados de los espaciamientos determinados para las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).	58
Tabla 8. Rangos de caracterización de macizos rocosos según la condición de las discontinuidades, planteado por Bieniawski (1989); en color rojo se pueden observar los puntajes asignados para cada rango. modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.....	58
Tabla 9. Puntaje de la persistencia para las rocas de la mina el roble (Fuente propia)	59
Tabla 10. Rangos de aperturas presentes en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia)	59
Tabla 11. Rugosidad en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).....	60
Tabla 12. Rellenos en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).....	60
Tabla 13. Alteración en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).....	60
Tabla 14. Valoración del macizo rocoso según el parámetro de agua subterránea planteado por Bieniawski (1989); en color rojo se pueden observar los puntajes asignados para cada rango. modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.	61
Tabla 15. Agua subterránea en el nivel 1712 (Fuente propia)	61



Tabla 16. Clases de macizos rocosos según los valores de RMR (Bieniawski, 1989), modificado de Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.....	63
Tabla 17. Puntaje RMR para el basalto (Fuente propia)	64
Tabla 18. Puntaje RMR para el chert negro (Fuente propia)	65
Tabla 19. Puntaje RMR para el sulfuro (Fuente propia).	66
Tabla 20. Puntaje RMR para los diques andesíticos (Fuente propia).....	67
Tabla 21. Grado de fracturamiento (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía., 2004). 67	
Tabla 22. Condición de resistencia y propiedades de las discontinuidades modificado de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía (2004) por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017).....	68
Tabla 23. Valores de RMR y su respectiva clasificación GSI calculada para las diferentes rocas presentes en el nivel 1712 (Fuente propia).....	69
Tabla 24. Paleta de colores según puntajes de RMR utilizados para las zonificaciones geomecánicas del cuerpo Zeus. Fuente (Fuente propia)	70
Tabla 25. Recomendaciones de sostenimiento para avances sobre las galerías en el nivel 1712 (Fuente propia)	75
Tabla 26. Sostenimiento recomendado para los avances desarrollados sobre los tajos en el nivel 1712 (Fuente propia).	79
Tabla 27. Condición de estabilidad para las excavaciones del nivel 1712 de la mina El Roble según la orientación de las discontinuidades. DF representa una condición desfavorable y F una condición favorable.	82
Tabla 28. Definición por orientación y ángulo de inmersión de la línea de intersección entre los planos de discontinuidades (Fuente propia).	84
Tabla 29. Clasificación geomecánica de las rocas según el criterio RMR (Fuente propia).....	85
Tabla 30. Clasificación geomecánica de las rocas según el criterio GSI (Fuente propia).	85
Tabla 31. Tiempo medio de autosoporte en excavaciones no superiores a 10 metros (Bieniawski, 1989).....	86
Tabla 32. Recomendaciones de sostenimiento implementadas para la primera etapa de extracción del nivel 1712 de la mina El Roble (Fuente propia).....	88



ANEXOS

Anexo 1. Mapa estructural del nivel 1712	103
Anexo 2. Mapa de zonificación geomecánica del nivel 1712.....	104
Anexo 3. Datos estructurales recolectados en el nivel 1712.....	105

1. INTRODUCCIÓN

La empresa minera El Roble S.A se encuentra ubicada sobre el flanco oriental de la Cordillera Occidental de Colombia, en el departamento del Chocó, en inmediaciones del municipio El Carmen de Atrato (Figura 1). Esta compañía se dedica a la explotación de cobre, oro y plata en la conocida mina El Roble, de la cual es propietaria la multinacional canadiense *Atico Mining Corporation*.

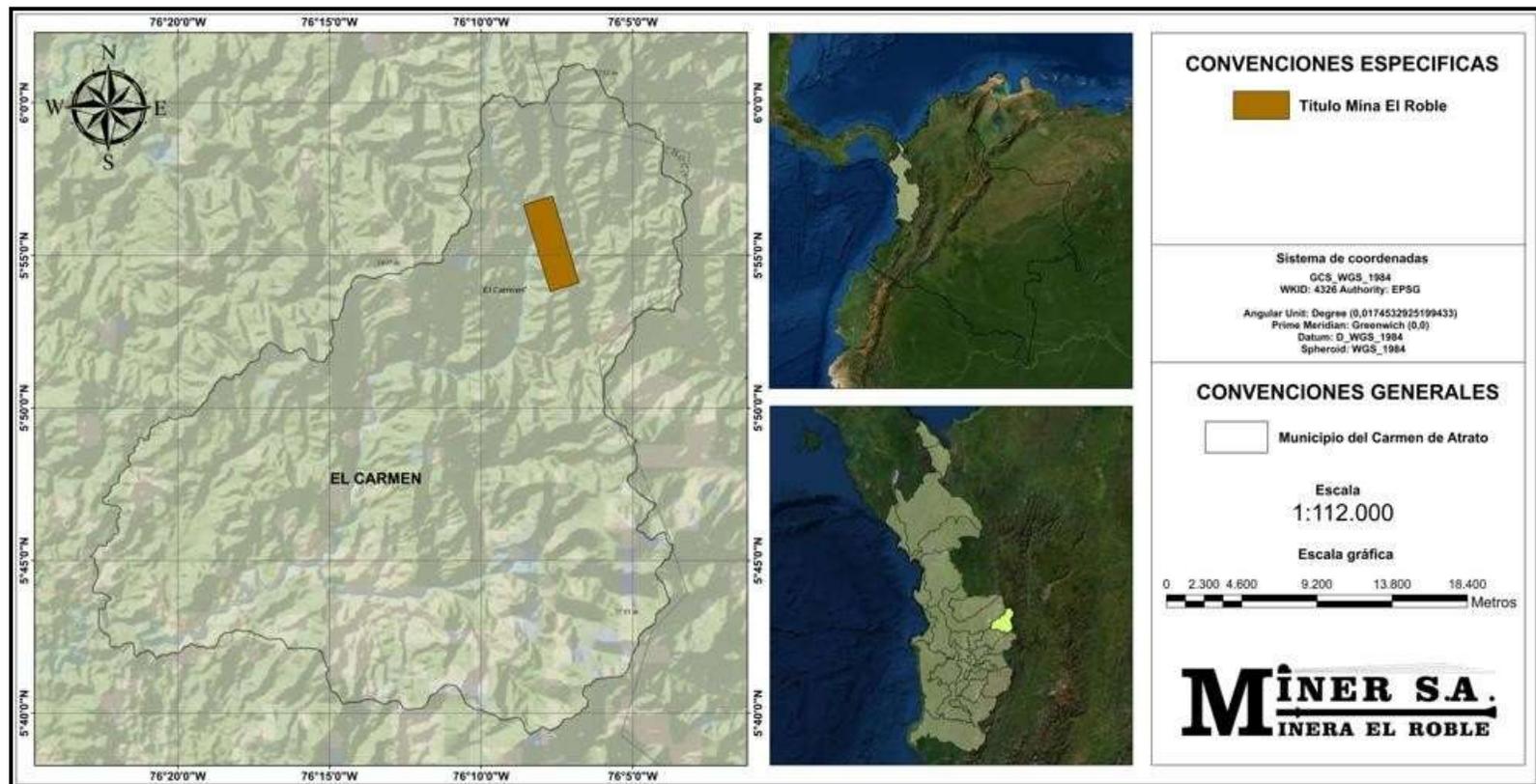


Figura 1. Localización título minero El Roble (Fuente propia).



Las operaciones de la mina El Roble se encuentran enfocadas a la extracción de cuerpos mineralizados conocidos como sulfuros masivos volcanogénico o depósitos tipo VMS; estos depósitos corresponden a acumulaciones concordantes de sulfuros en secuencias volcano-sedimentarias; estos depósitos se forman en fondos oceánicos, producto de la precipitación e interacción de fluidos magmáticos y aguas profundas (Franklin et al., 1981; Franklin et al., 2005). Las unidades litológicas presentes en el área hacen parte del Grupo Cañas Gordas, el cual está constituido por dos formaciones: Formación Barroso (basamento) compuesta por basaltos toleíticos y andesitas con textura porfírica y la Formación Penderisco (cobertera) conformada por rocas volcano-sedimentarias (Echeverri y Salas, 2017). El sulfuro masivo volcanogénico (VMS) se encuentra emplazado en rocas de chert negro, principalmente como roca caja próxima, tanto la roca caja como el VMS suprayacen los basaltos de la Formación Barroso y subyacen parte del Miembro Urrao de la Formación Penderisco (Martínez, 2021). Este yacimiento es el único de su tipo actualmente en explotación en Colombia, presenta varios cuerpos mineralizados, de los cuales el de mayor importancia es el denominado cuerpo Zeus, (Smith y Pohl, 2012), el cual es explotado actualmente mediante el método conocido como *Drift and Fill*, apoyado en el relleno detrítico cementado (RDC). El depósito representa una zona geológicamente inestable de baja calidad, caracterizada por estar intensamente fracturada, plegada y alterada producto de la actividad tectónica asociada a la Cordillera Occidental y los factores atmosféricos que se intensifican en esta zona del trópico. En este informe se presentan los diseños de sostenimiento ejecutados durante la primera etapa de extracción del nivel 1712 del cuerpo Zeus, a partir de los resultados calculados en campo mediante la caracterización geomecánica de cada uno de los avances realizados; una vez obtenidos estos valores se realizó una zonificación de nivel con base en los diferentes rangos de RMR, lo que permite llevar un registro general e histórico de la calidad de este depósito.



2. JUSTIFICACIÓN

Estructuralmente el yacimiento de la mina El Roble representa una zona geológicamente inestable enmarcada por la presencia de fallas de componente principalmente sinistral-inverso (Echeverri y Salas, 2017), de carácter local y regional que han segmentado el depósito en una serie de cuerpos basculados, plegados e intensamente fracturados, producto de la actividad tectónica asociada a la Cordillera Occidental. Estas características estructurales, sumadas a la meteorización producto de factores atmosféricos intensos característicos de esta zona tropical del país, han generado en el macizo características desfavorables de calidad, lo que beneficia la inestabilidad de la masa rocosa y las probabilidades de accidentalidad por caídas de roca.

Producto de una serie de incidentes históricos causados por caída de roca dentro de la mina, y después de la adquisición de Minera El Roble S.A, por parte de *Atico Mining Corporation*, la empresa debe cumplir con estándares de seguridad y con índices bajos de accidentalidad por caída de roca; estos ítems favorecen fuertemente su participación en la bolsa de valores. Por esta razón, se creó el departamento de geomecánica dentro de esta operación minera, con el fin de generar un diseño estándar de sostenimiento según las características geomecánicas del yacimiento y las necesidades de la operación, de tal manera, que se garantice la seguridad de todo el personal y el ágil desarrollo de todos los procesos de extracción.

Garantizar que el diseño de sostenimiento funcione de manera adecuada dependerá de las caracterizaciones geomecánicas determinadas en cada uno de los avances, tal como se presenta en este informe para el nivel 1712.



3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Determinar los elementos necesarios para la estabilidad de labores temporales y permanentes en el nivel 1712 del cuerpo Zeus de la mina El Roble, a partir de la caracterización geomecánica del macizo rocoso y siguiendo los criterios de clasificación propuestos por Bieniaswki (1989) (RMR) y Hoek y Marinos (2000) (GSI).

3.2. Objetivos específicos.

- Recopilar una serie de datos estructurales y de condiciones físicas de las discontinuidades (diaclasas y fallas) tras cada avance en el nivel 1712.
- Realizar un análisis estructural del nivel 1712 que permita identificar las tendencias estructurales más marcadas y familias de discontinuidades principales y secundarias; con el fin de estimar en términos de estabilidad que avances se verían favorecidos y cuales se verían afectados por la orientación de las discontinuidades.
- Determinar los valores de RMR y GSI con el fin de clasificar el macizo rocoso sobre el que se genera cada avance en el nivel 1712.
- Determinar una serie de elementos de sostenimiento basado en los valores calculados de RMR y GSI, y apoyado en el estándar de sostenimiento diseñado por el área de geomecánica, con el fin de estabilizar cada una de las labores post-voladura.
- Generar un plano del nivel 1712 con los datos estructurales y los valores calculados de RMR y GSI con el fin de tener un control espacial de las discontinuidades y delimitar zonas según la calidad del macizo.



4. METODOLOGÍA

4.1. Etapa 1. Trabajo de campo

Esta etapa consistió en una serie de recorridos diarios con el fin de evaluar los frentes post-voladura, realizando un levantamiento de información geológica para indicar el tipo de sostenimiento a instalar, así:

- Se tomaron datos estructurales, mediante mediciones azimutales de las diferentes familias de diaclasas y fallas presentes al techo de las labores en el nuevo avance.
- Se realizó la caracterización geomecánica de las discontinuidades evaluando los siguientes parámetros con el fin de determinar el puntaje RMR y la clasificación GSI: 1) resistencia a la compresión uniaxial; 2) el *Rock Quality Designation* (RQD); 3) de las discontinuidades; 4) persistencia; 5) abertura; 6) rugosidad; 7) tipos de relleno; 8) alteración; y 9) presencia de agua subterránea.
- Se efectuó un mapeo geomecánico a mano, que incluye los planos de fallas y familias de discontinuidades principales, y la distribución geológica del avance.
- Se calculó el RMR según los parámetros geomecánicos de las discontinuidades y se determinó la clasificación GSI del macizo presente en el avance. Estos dos cálculos se consignaron en el formato de clasificación modificado de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía (2004) por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017).
- Por último, se dieron las indicaciones de sostenimiento basadas en el diseño de sostenimiento de Minera El Roble, a partir del tipo de labor (temporal o permanente) y la clasificación geomecánica obtenida.



4.2. Trabajo de oficina

El trabajo de oficina consistió en la recopilación de información bibliográfica, la consolidación de la información recolectada en campo y la elaboración de este informe de la siguiente manera:

4.2.1. Compilación y organización de la información

- Posterior a los recorridos diarios en la mina, se procedió a consolidar la información recolectada; en primer lugar, se digitalizaron los mapas geomecánicos del nivel con el programa AutoCAD; se actualizó la base de datos estructurales de la mina en el formato azimutal y en *Dip/Dip direction* y por último se archivaron los formatos de clasificación utilizados.

4.2.2. Implementación de *software*

- Se realizó un mapa geomecánico del nivel en AutoCAD, en este se consignaron todos los datos estructurales recopilados en campo, así como los parámetros y las clasificaciones geomecánicas obtenidas. Se implementaron las convenciones adaptadas por el área de geomecánica, lo que a su vez permitió generar una zonificación geomecánica a partir de la delimitación de zonas con características geomecánicas similares.
- Se filtró la información estructural de la mina, captando la información tomada en el nivel 1712 (Anexo 1), con base en esta información se realizaron en el *software DIPS* los diagramas de roseta, de contornos y el estereograma estructural, lo que permitió definir las principales tendencias estructurales del nivel 1712 y obtener una idea de las labores cuya calidad y avances se ven favorecidos o afectados por el control estructural característico de este nivel.



4.2.3. Análisis de las características geomecánicas del nivel 1712

- Con la información registrada en el mapa geomecánico, la base de datos estructural y los formatos de clasificación geomecánica, se realizó un análisis en el cual se estableció la calidad de los principales macizos rocosos sobre los cuales avanzó la primera etapa de extracción del nivel 1712, con base en los criterios de clasificación internacional RMR y GSI, planteados por Bieniawski (1989) y Hoek y Marinos (2000). De acuerdo a esto se definió el tipo de sostenimiento implementado para garantizar la estabilidad del nivel.

4.2.4. Elaboración del informe

- La elaboración de este informe inició mediante la recopilación bibliográfica y el análisis de la información preexistente, teniendo en cuenta estudios previos similares, además, se realizó una revisión bibliográfica general que permitió obtener un contexto geológico de la zona y un concepto técnico sobre los criterios de clasificación geomecánica y los elementos de sostenimiento implementados por el área de geomecánica de Minera El Roble S.A. Posteriormente, se incorporaron los resultados obtenidos a partir de los ítems anteriores y finalmente una serie de recomendaciones dadas para la extracción de los tajos secundarios en la segunda etapa de explotación de este nivel.



5. MARCO TEÓRICO

La implementación de las clasificaciones geomecánicas implica la determinación de una serie de parámetros geológicos y estructurales que permitan estimar las condiciones de estabilidad y deformación que presenta el macizo rocoso, de esta manera es posible establecer un sistema de sostenimiento que permita estabilizarlo. El diseño de sostenimiento implementado en la mina El Roble se encuentra bajo la determinación y supervisión del departamento de geomecánica, que ha logrado reducir los índices de accidentalidad por caída de roca, implementando las bases teóricas establecidas en los criterios de clasificación RMR y GSI (Bieniawski, 1989; Hoek y Marinos, 2000), adaptándolos a las características del yacimiento y ejecutando un programa de control de calidad que garantiza la integridad de los sistemas de sostenimiento instalados.

5.1. Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS)

Los depósitos tipo VMS son acumulaciones de sulfuros producto de la precipitación de este tipo de minerales a partir de pulsos hidrotermales cargados en metales y azufre derivados de la interacción de aguas profundas y fluidos magmáticos; estas acumulaciones, se dan de manera concordante en secuencias volcano-sedimentarias formadas en fondos oceánicos, cuya formación es contemporánea con las acumulaciones de este tipo de depósitos (Franklin *et al.*, 2005). Los depósitos VMS se componen principalmente de sulfuros como la pirita, calcopirita, esfalerita, galena, magnetita y cuarzo, y son importantes fuentes de elementos como cobre, zinc, plomo, oro y plata (Espinal-Corrales, 2020).

La Figura 2 presenta el modelo genético propuesto por Franklin *et al.* (2005), este modelo asume los depósitos VMS como depósitos singenéticos producto de sistemas hidrotermales generados volcánicamente, el modelo presenta seis elementos principales que favorecen la existencia de este tipo de depósitos: 1) fuente de calor que potencializa el sistema hidrotermal y

aporta algunos metales; 2) zona de interacción de fluidos magmáticos y agua de mar que favorece la lixiviación de metales a partir de rocas volcánicas y sedimentarias; 3) sistema de fracturas que facilita los pulsos de los fluidos hidrotermales; 4) zonas de alteración producida por la reacción de los fluidos hidrotermales con la roca; 5) depósito de sulfuro masivo; y 6) productos distales que contribuyen a la sedimentación del fondo oceánico.

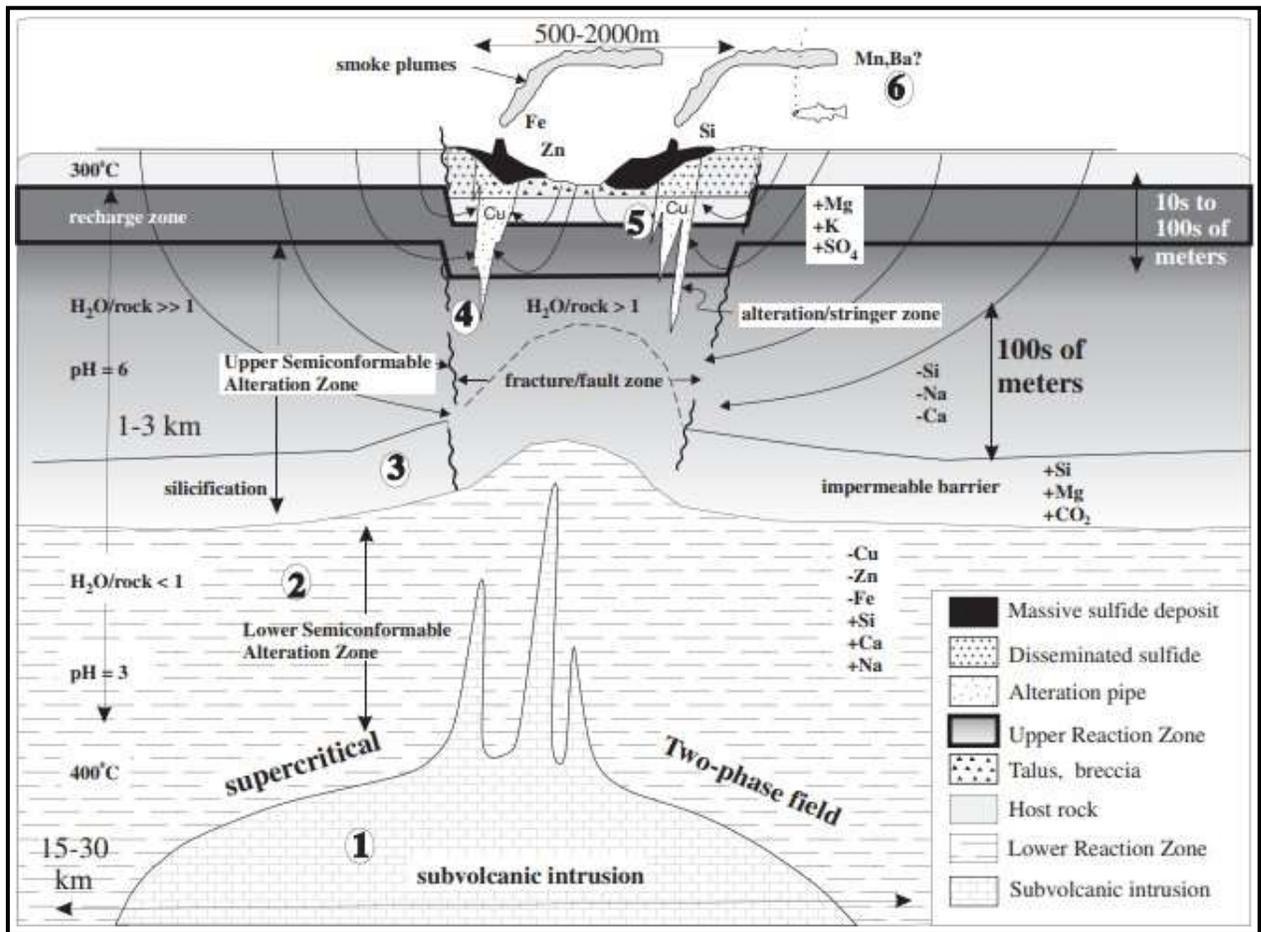


Figura 2. Modelo genético para la formación de depósitos tipo VMS, modificado de Galley, (1993) y Franklin, (1995) por Franklin *et al.* (2005).



5.2. Geomecánica

La geomecánica estudia la deformación y posterior falla de suelos y rocas como respuesta a las variaciones de presión y temperatura derivados del sometimiento de estos elementos a esfuerzos y factores atmosféricos (Cook, 2016). Esta disciplina está basada en conocimientos geológicos e ingenieriles con el fin de evaluar la estabilidad de los macizos rocosos y diseñar sistemas de sostenimiento que permitan estabilizarlos y mitigar los accidentes ocasionados por caída de roca o deslizamientos que puedan afectar poblaciones u operaciones industriales. Dentro de la industria minera, es de especial importancia para generar ambientes seguros de trabajo sobre todo en aquellos yacimientos que involucran macizos fuertemente afectados por tectónica y los cuales también se encuentran muy alterados; en especial, aquellas labores subterráneas donde las presiones aumentan conforme se profundiza en el yacimiento.

5.2.1. Conceptos Base

A continuación, se describen algunos conceptos comúnmente utilizados.

5.2.1.1. Discontinuidad

Una discontinuidad en el área de la geomecánica hace referencia a cualquier estructura geológica y/o estructural que interrumpa la homogeneidad y continuidad de masas rocosas o de suelo (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004). Los principales tipos de discontinuidades presentes en un macizo rocoso son: diaclasas, fallas, planos de estratificación, planos de foliación, contactos litológicos y sistemas vetiformes. A continuación, se definen los dos principales tipos de discontinuidades de interés para este informe:

- Fallas: Son fracturas con desplazamiento de sus bloques adyacentes, producto de esfuerzos en el terreno. Dentro de la mina se presentan de forma local en los avances y

algunas estructuras importantes que atraviesan toda la mina, suelen reconocerse fácilmente por superficies estriadas.

- **Diaclasas:** Son fracturas en el terreno cuyos bloques adyacentes no presentan desplazamiento apreciable, estas suelen ser de mayor densidad, formando sets o familias (estructuras con orientación similar) (Figura 3).



Figura 3. Sistema de discontinuidades con 3 sets de diaclasas en un macizo muy fracturado con formación de bloques de roca (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

5.2.1.2. Macizo rocoso

Un macizo rocoso comprende el conjunto de material rocoso (las diferentes litologías presentes) y las discontinuidades existentes en el mismo; su escala depende del interés del evaluador y puede ir de algunos centímetros a kilómetros de extensión (Sánchez-Niño, 2017).

5.2.1.3. Bloque de roca intacta

Es la representación intacta, homogénea y continua de un macizo rocoso. Su escala suele ser de algunos pocos centímetros dependiendo el grado de fracturamiento del macizo; estos bloques



son de interés para medir las propiedades de resistencia y deformación de la roca mediante análisis de laboratorio (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía, 2004).

5.3. Caracterización geomecánica

La caracterización geomecánica consiste en la evaluación de una serie de características presentes en los macizos rocosos, producto del intemperismo y de su respuesta ante los esfuerzos. A partir de estas propiedades se establece la calidad de los macizos, lo que permite conocer la respuesta de estos ante las perturbaciones antrópicas. A continuación, se definen las principales características geomecánicas a partir de las cuales se establece la clasificación geomecánica de los macizos rocosos expuestos en el yacimiento de la mina El Roble.

5.3.1. Resistencia a la compresión uniaxial

Este parámetro de evaluación geomecánica mide la resistencia de la roca para mantener unidos todos sus componentes, este factor depende principalmente de la composición mineralógica de la roca y el grado de alteración (Rodríguez, 2007 en Betancur y Balaguera, 2019). Las unidades de medida para este parámetro son los Megapascales, esta unidad puede ser obtenida mediante ensayos de compresión uniaxial y/o puntual, por correlaciones con el Martillo *Schmidt* y mediante tablas de correlación con el martillo geológico. Con el fin de realizar mediciones ágiles en campo, los cálculos de resistencia a la compresión uniaxial en el macizo de El Roble se establecen principalmente mediante la correlación de tablas con los golpes del martillo geológico (Tabla 1), aunque de manera puntual se realizan campañas de medición con el martillo *Schmidt*.

Tabla 1. Resistencia estimada de la roca con base en golpes de picota (S.R.L.tda, 2017).

Grado	Descripción	Identificación de campo	Rango aprox. (Mpa)
R1	Roca muy débil	Desmenuzable bajo golpes firmes con la punta de un martillo de geólogo.	1.0 - 5.0
R2	Roca débil	Puede hacerse marcas poco profundas golpeando firmemente con el martillo de geólogo.	5.0 - 25
R3	Roca medianamente dura	La muestra puede romperse con un golpe firme de martillo de geólogo.	25 - 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo de geólogo para fracturar la muestra	50 - 100
R5	Roca muy dura	Se requieren varios golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra	100 - 250
R6	Roca extremadamente dura	Solo se rompen esquirlas de la muestra con el martillo de geólogo.	>250

5.3.2. Rock quality designation (RQD)

Según lo descrito por Zhang (2016) “El RQD definido como el índice de designación de calidad de la roca, fue desarrollado por Deere (1964) como una medida de calidad en núcleos de perforación. Se define como la relación en porcentaje de la sumatoria total de las partes de roca intacta mayores a 10 cm de longitud en relación con la longitud total del núcleo” (Figura 4). Existen algunos métodos indirectos para la determinación del RQD, uno de estos es implementado por el departamento de geomecánica de la mina el roble el cual se establece mediante una medición visual del número de fracturas presentes por metro lineal en el macizo rocoso.

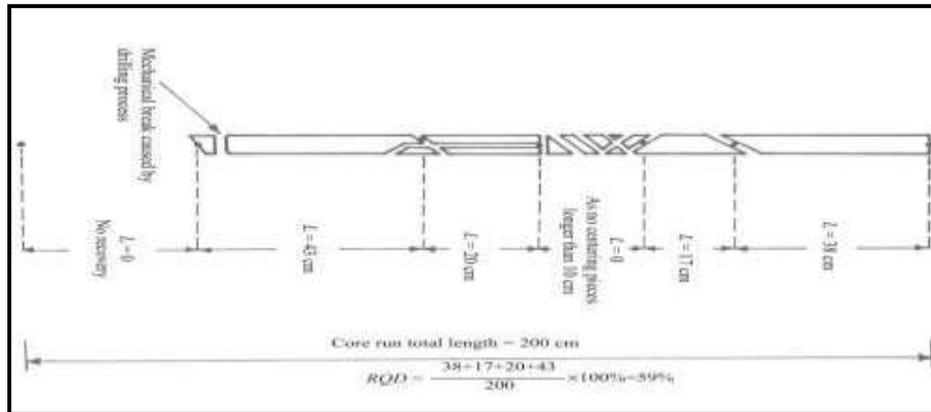


Figura 4. Método de medición directo para el cálculo del RQD en testigos de perforación (Zhang, 2016).

5.3.3. Espaciamiento

El espaciamiento es un parámetro que se refiere a la distancia perpendicular entre discontinuidades de una misma familia, permite estimar el tamaño de los bloques de roca; generalmente se toma como un valor promedio entre los valores calculados para el número de familias presentes en el macizo; entre menor es el espaciamiento mayor será el fracturamiento y menor el tamaño de los bloques de roca (Martínez, 2019) (Figura 5).

5.3.4. Condición de las discontinuidades

Este ítem engloba cinco parámetros que permiten describir la condición de las superficies que componen las discontinuidades presentes en el macizo evaluado.

5.3.4.1. Persistencia

Es la extensión en área o longitud de una discontinuidad, las estructuras mayores tienden a ser más persistentes, es decir, se extienden por varios metros, en ocasiones kilómetros como en el caso de fallas regionales, mientras que, estructuras menores como diaclasas suelen persistir algunos centímetros en ocasiones metros. Cuanto menor sea la persistencia la masa rocosa será más estable (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía, 2004) (Figura 5).



Figura 5. Espaciamiento (flechas naranjas) y persistencia (líneas negras) medidos en un macizo de sulfuro (Fuente propia).

5.3.4.2. Abertura

Este término hace referencia a la distancia que define la separación entre las paredes o caras de las discontinuidades, entre más amplia sea la abertura, mayor inestabilidad presentará el macizo rocoso (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía, 2004) (Figura 6).

5.3.4.3. Relleno

Este parámetro se refiere al material que se presenta dentro de las discontinuidades cubriendo parcial o totalmente los vacíos generados por las fracturas presentes en el macizo, los rellenos pueden ser de dos tipos: duros o blandos; los blandos corresponden a material arcilloso producto de alteración o trituración de la roca por fallamiento, y los rellenos duros corresponden composicionalmente a la precipitación de minerales derivados de la circulación de fluidos entre las fracturas (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía, 2004) (Figura 6).



Figura 6. Muestra de Chert negro de la Mina El Roble con aberturas de 1 a 5mm (flechas azules) y rellenos duros de composición calcárea. Modificado de (Espinal-Corrales, 2020).

5.3.4.4. Rugosidad

Se refiere a la aspereza o irregularidad que se presenta sobre las caras que componen los bloques de la masa rocosa, las superficies más rugosas generan mayor fricción entre los bloques lo que favorece la estabilidad del macizo (Martínez, 2019) (Figura 7).



Figura 7. Rugosidad presente en sulfuro, las flechas azules marcan las zonas con diferentes tipos de rugosidad (Fuente propia)

5.3.4.5. Alteración

Este término es el producto de una serie de factores como la meteorización química y física de la roca (producto del intemperismo y la circulación de agua); la alteración hidrotermal y los esfuerzos inducidos en la roca que generan el deterioro o descomposición de la roca. La alteración es un parámetro que se mide en cinco clases: 1) Roca sana; 2) ligeramente alterada; 3) moderadamente alterada; 4) muy alterada; y 5) descompuesta. Una roca sana corresponde a una roca dura, homogénea, con su fábrica original intacta y sin alteraciones de ningún tipo, mientras que la clase descompuesta corresponde a un suelo o saprolito, donde toda la estructura original de la roca se ha perdido. En la figura 8 se puede observar una zona de contacto entre basalto y chert negro, estas dos unidades se observan muy alteradas e intensamente fracturadas a trituradas; nótese la tonalidad verdosa en el basalto producto de alteración a minerales de clorita y epidota.



Figura 8. Zona de contacto (línea punteada negra) entre basalto y chert negro (Fuente propia).



5.3.4.6. Otros factores

Es importante al momento de evaluar un macizo rocoso, tener presente factores como la presencia de agua, los esfuerzos actuales a los que se encuentra sometido el terreno y la presencia de fallas principales, pues estos factores podrían modificar la respuesta del macizo al ser perturbado (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía, 2004).

5.4. Sistemas de clasificación geomecánica

Actualmente existen varios sistemas de clasificación geomecánica para macizos rocosos, siendo lo más conocidos e implementados actualmente en minería subterránea el índice Q de Barton, el sistema de clasificación RMR y el GSI (Barton, 1974; Bieniawski, 1989; Hoek y Marinos, 2000). El diseño de sostenimiento utilizado en la mina El Roble se fundamenta en los dos últimos debido a la agilidad con la que se puede establecer su cálculo.

5.4.1. Rock Mass Rating (RMR)

El sistema de clasificación RMR, se fundamenta en 6 parámetros de evaluación *insitu* del macizo rocoso: 1) resistencia a la compresión uniaxial; 2) índice de calidad de la roca (RQD); 3) espaciamiento; 4) condición de las discontinuidades; 5) agua subterránea; y 6) orientación de las diaclasas (Pérez *et al.*, 2017). Sin embargo, la orientación de las diaclasas más que un parámetro dentro de la clasificación RMR es una corrección al valor calculado a partir de los primeros cinco; en el caso particular de la mina El Roble suele pasarse por alto en el cálculo debido a la agilidad que se debe tener en las caracterizaciones realizadas en las operaciones mineras y es tenido en cuenta como un factor extra cuando su presencia dentro de los avances es verdaderamente influyente. La Figura 9 presenta el formato de clasificación geomecánica RMR propuesto por la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía del Perú y modificado por el Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble.



5.5. Sistema de sostenimiento

Se entiende como sistema de sostenimiento al conjunto de elementos estructurales que se instalan durante la excavación de una obra subterránea y que tiene como objetivo contribuir al equilibrio del entorno cercano a la cavidad (Figura 11) (Esparza, 2016).

5.5.1. Elementos de sostenimiento

Durante la construcción de la tunelería en la mina El Roble debe tenerse en cuenta el tipo de labor a sostener, si son labores permanentes (rampas, chimeneas, pozas de bombeo) o si son labores temporales (tajos y galerías). En general se busca que el terreno en el entorno de la excavación sea estable o alcance su estabilidad en un tiempo razonable, es decir, que no ocurran desplazamientos ni deformaciones mayores; tampoco roturas, fracturas, caídas o demás manifestaciones que indiquen inseguridad y que generen riesgos que comprometan la seguridad de las personas y las operaciones.

Los elementos de sostenimiento pueden ser activos o pasivos, el primero hace referencia a elementos que al ser instalados forman parte integral del macizo rocoso como *split set*, pernos helicoidales y enfilajes; el segundo comprende aquellos elementos de sostenimiento que son instalados en el exterior de la roca y que actúan después de que esta empieza a deformarse, como la malla electro soldada, el *shotcrete*, cimbras metálicas y las varillas. (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004).

A continuación, se describen los elementos de sostenimiento utilizados en la mina El Roble para la estabilidad de los túneles.



5.5.1.1. Concreto lanzado *Shotcrete* (SH)

Concreto lanzado (*shotcrete*) es el nombre genérico del concreto cuyos componentes son: cemento, agregados, agua, aditivos y elementos de refuerzo; los cuales son aplicados neumáticamente y compactados dinámicamente a alta velocidad sobre una superficie (Figura 11 A) (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004). Debidamente instalado, es decir, bajo las técnicas de lanzado y con las características físicas adecuadas que le otorguen resistencia y maleabilidad ante la deformación, es un excelente elemento de sostenimiento en cualquier tipo de macizo. Dentro de la mina El Roble, este elemento es utilizado como la base de todos los sistemas estándar para los macizos presentes en el yacimiento, aunque por sí solo no garantiza un largo periodo de estabilidad, razón por la cual debe ser acompañado de otros elementos como las mallas y los pernos helicoidales o *split set*, además debe ser constantemente monitoreado, ya que cuando se fisura por la carga del macizo tiende a ceder rápidamente.

5.5.1.2. Malla electro soldada (M)

La malla metálica es utilizada principalmente para: 1) retener los bloques sueltos en macizos muy fracturados donde el tamaño de los bloques es mayor al de las cocadas presentes en la malla (10x10cm generalmente); 2) funciona como sostenimiento auxiliar cuando la masa de roca supera en algún momento la capacidad de los pernos; y 3) reforzamiento del *shotcrete* en macizos intensamente fracturados y deformados donde las condiciones de estabilidad son críticas (Figura 11 B) (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004).

5.5.1.3. Pernos de roca (PH)

Según la Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía (2004): “Los sistemas de reforzamiento con pernos de roca minimizan las deformaciones inducidas por el peso muerto de la roca aflojada, así como también aquellas inducidas por la redistribución de los esfuerzos en la

roca circundante a la excavación” (Figura 11 C). Su mayor importancia se da en aquellos macizos muy fracturados con formación de bloques y cuñas de gran tamaño, su capacidad de soporte es de 21 toneladas, aunque instalado en sistemático su factor de seguridad aumenta.

5.5.1.4. Split set (SS)

Los *split sets*, representan el más reciente desarrollo de técnicas de reforzamiento de roca, este elemento trabaja por fricción (resistencia al deslizamiento) a lo largo de toda la longitud del taladro (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004) (Figura 11 D). Este se considera como otro tipo de perno, otorga las mismas características de sostenimiento de un perno, pero con capacidad de 9 a 11 toneladas, por lo que retiene cuñas y bloques de menor tamaño, es comúnmente utilizado en labores temporales como los tajos, debido al corto tiempo de actividad de este tipo de labores.

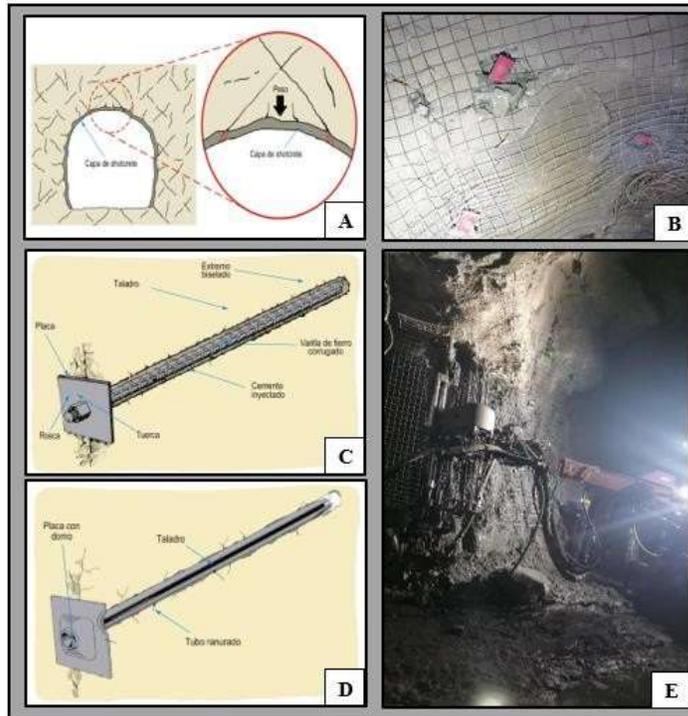


Figura 11. Elementos de sostenimiento A) Shotcrete, B) Malla electrosoldada, C) Perno Helicoidal, D) Split set, E) sistema de sostenimiento integrado por estos 4 elementos (Fuente propia).

5.5.1.5. Cimbras

Es un tipo de sostenimiento pasivo generalmente usado para la estabilización de labores de avance permanentes y críticas en términos de estabilidad debido a que se encuentran intensamente fracturadas, muy alteradas y sometidas a condiciones de altos esfuerzos (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004). Las cualidades principales de este elemento de sostenimiento son su alta capacidad de tonelaje, su durabilidad en el tiempo y el hecho de que aún después de ceder ante la deformación continúan generando soporte (Figura 12).

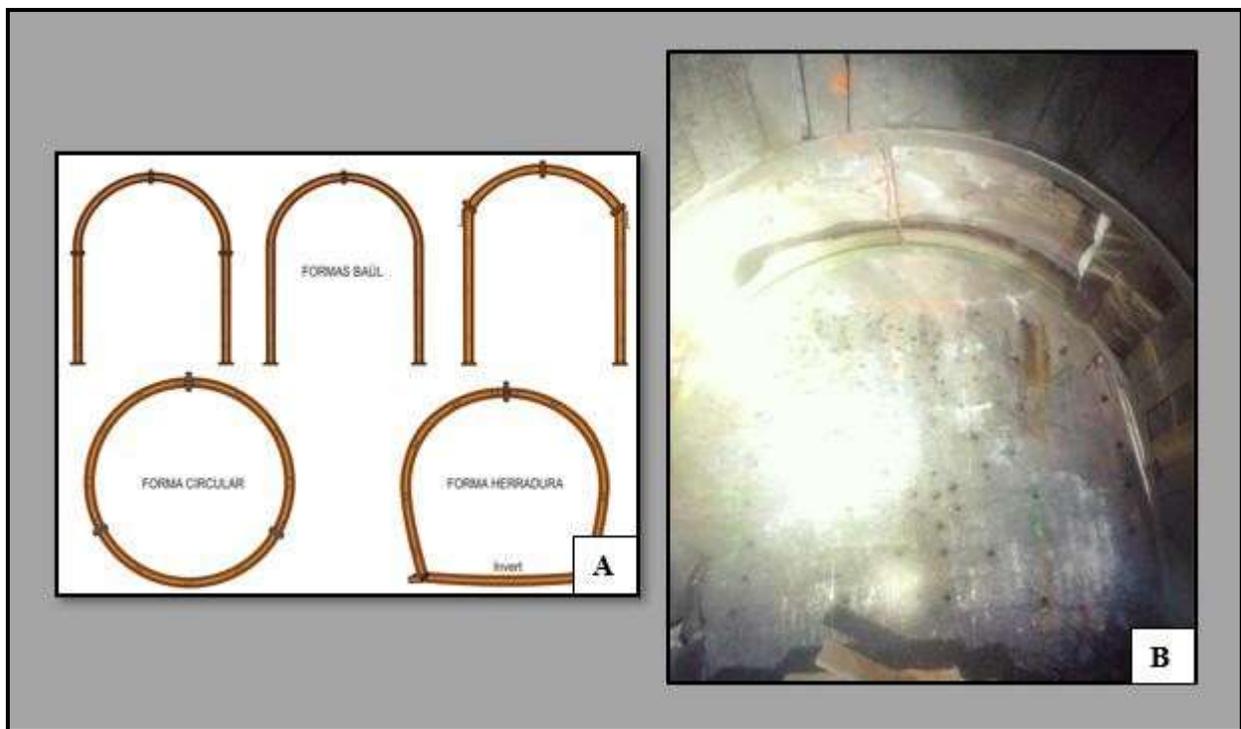


Figura 12. Cimbras de sostenimiento A) Tipos de cimbras (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004). B) Instalación de Cimbras tipo baúl en la mina El Roble en el nivel 1872 (Fuente propia).

5.5.1.6. Shot-fer o Concreto armado

Es un sistema de sostenimiento pesado que implementa elementos de sostenimiento tanto activos como pasivos, es utilizado generalmente en el sostenimiento de labores permanentes con una calidad de masa rocosa mala o muy mala, intensamente fracturada y sometida a condiciones



de altos esfuerzos. Este sistema está compuesto por *Shotcrete*, malla metálica, un sistema de varillaje y *Split sets*.

5.5.1.7. Enfilajes

Los sistemas de enfilajes, son un sistema de sostenimiento activo utilizado especialmente en terrenos malos intensamente fracturados. Este sistema, se apoya en el uso del microcemento con el fin de rellenar las fracturas presentes en el macizo para generar estabilidad en este.

5.6. Estándar de sostenimiento de la mina El Roble

Como ya se ha dicho la base del ciclo de sostenimiento en la mina el roble son los sistemas de clasificación RMR y GSI. Una vez obtenida la clasificación GSI para el frente en evaluación, esta se ubica en la tabla GSI de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía (2004) modificada por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017), de acuerdo con las características geomecánicas del depósito. Las principales modificaciones establecidas por dicho departamento son: 1) Reducción de los ítems correspondientes a la estructura de las discontinuidades a tres únicos parámetros (Fracturado, Muy fracturado e intensamente fracturado); 2) La clasificación de las condiciones de las discontinuidades se limita a cuatro calificativos (Buena, regular, pobre y muy pobre); y 3) a la parte superior izquierda se presentan los diferentes diseños de sostenimiento implementados en la mina El Roble.

El calificativo GSI puede presentar dos posibles tipos de sostenimiento a emplear (tipo A, B, C, D, E o F) del cual se selecciona uno de acuerdo con el puntaje RMR y el tipo de labor, permanente (Figura 13) o temporal (Figura 14).

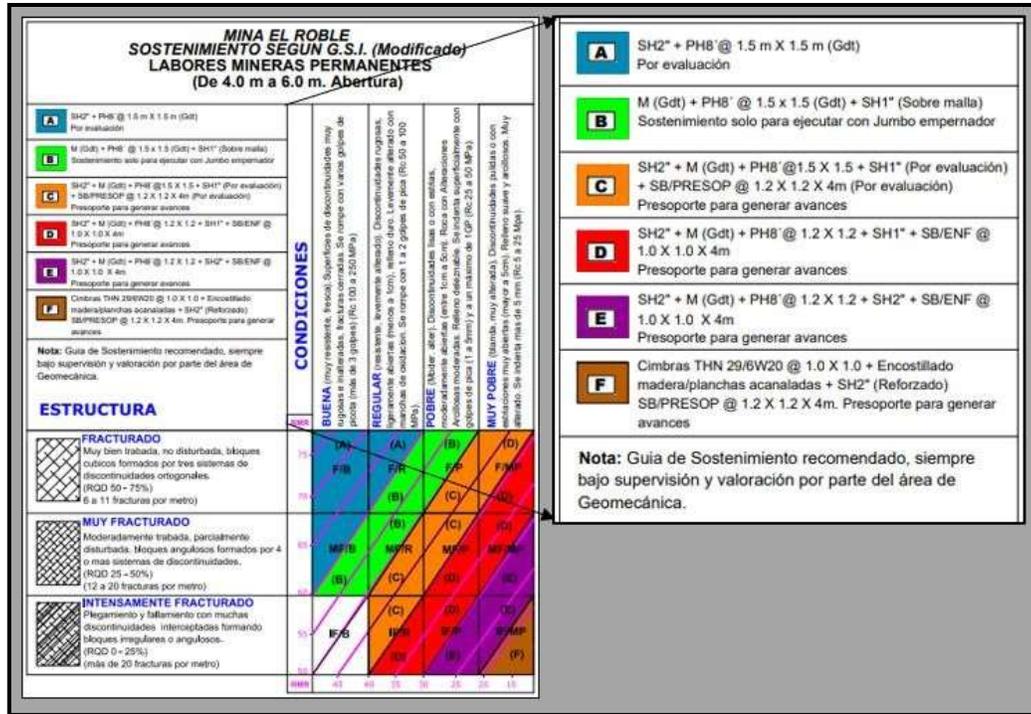


Figura 13. Estándar de sostenimiento para labores mineras permanentes (Modificada de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004 por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble, 2017).

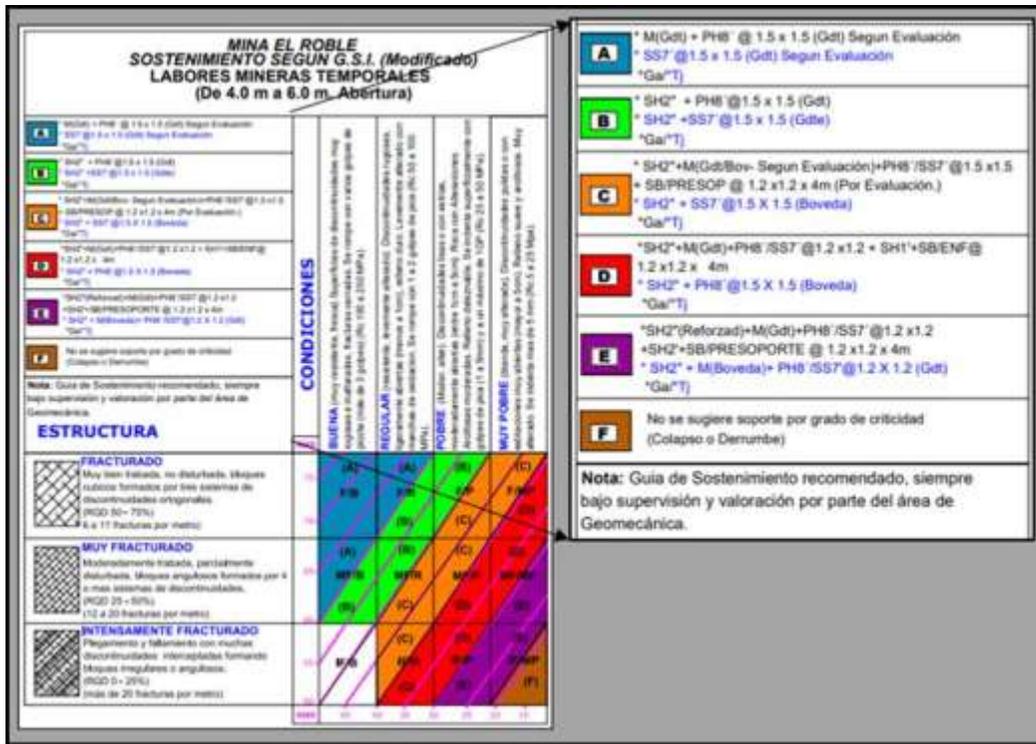


Figura 14. Estándar de sostenimiento para labores mineras temporales permanentes (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017).

6. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN O MINADO

6.1. Corte y relleno en cámaras y pilares (ascendente)

Este método consiste en arrancar el mineral por franjas horizontales conocidas como cámaras o tajos, una vez extraída una franja, se rellena con material estéril cementado, conocido con el nombre de relleno detrítico cementado (RDC), con el fin de generar una transferencia de esfuerzos que va desde el cuerpo mineralizado hacia el RDC, de tal manera que una vez culminado el ciclo de explotación de la mina, la totalidad del cuerpo mineralizado habrá sido remplazado por relleno detrítico cementado. Este método es utilizado debido a la baja calidad del macizo rocoso presente en el área de explotación de la mina; su principal objetivo es la extracción de todo el mineral en dos pasos: 1) extraer 50% del mineral en un nivel y reemplazar mineral con relleno detrítico cementado de alta resistencia (9.5 Mpa); 2) extraer los pilares remanentes, que corresponden 50% restante del mineral y rellenar con relleno detrítico cementado; de esta forma, la masa del cuerpo mineralizado es reemplazado por el relleno detrítico cementado.

Para el cuerpo Zeus, el método plantea la división en bloques, cada bloque compuesto por tres pisos o niveles (nombrados según la cota sobre el nivel del mar a la que se encuentran) y separado del bloque siguiente por un puente mineral que será el último en ser explotado una vez sean explotados los pisos adyacentes. En cuanto a los niveles, cada uno es dividido en paneles primarios y secundarios, cada panel está compuesto por tres tajos de 5 x 5 metros, estableciendo un patrón de tablero de ajedrez (Figura 15).

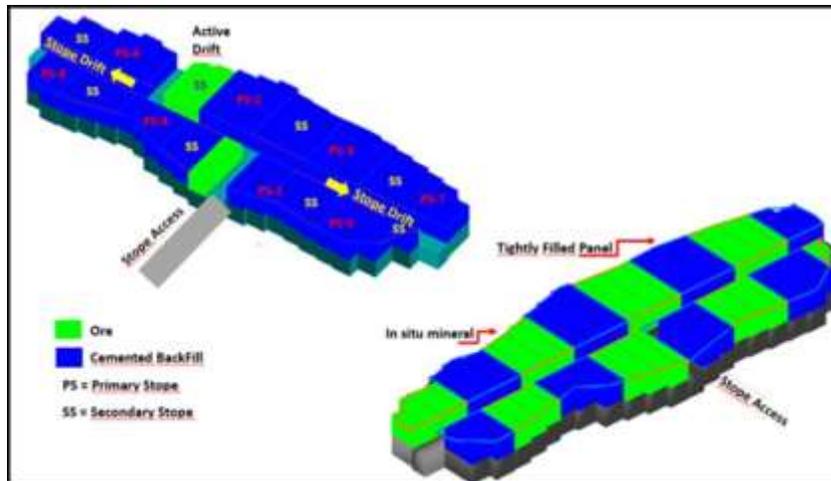


Figura 15. Esquema de explotación de niveles en el cuerpo Zeus, paneles primarios (PS) y secundarios (SS) (Kelly, 2021).

Este método de explotación se divide en tres etapas:

- **Primera etapa:** inicia con la extracción del primer piso de un bloque al cual se accede por medio de una labor conocida como ventana, cuya disposición es perpendicular al eje mayor del cuerpo y se extiende hasta llegar al cuerpo mineralizado; una vez allí inicia el desarrollo de la galería, esta labor corta el cuerpo de sulfuro y da el acceso a los tajos de explotación (Figura 16), permitiendo el inicio de la explotación de los paneles primarios (Figura 17), una vez culminada la explotación de un tajo (Hasta el contacto con la roca caja) se rellena con RDC. Por último, finalizada la extracción de todos los tajos primarios se procede con el relleno de la galería y terminada la extracción de los paneles primarios del primer piso, se continúa con la extracción de estos en los pisos superiores de forma ordenada. Tanto los paneles primarios como los paneles secundarios están alineados, de manera tal que, una vez explotados los paneles primarios, los secundarios quedan formando un pilar mineral.

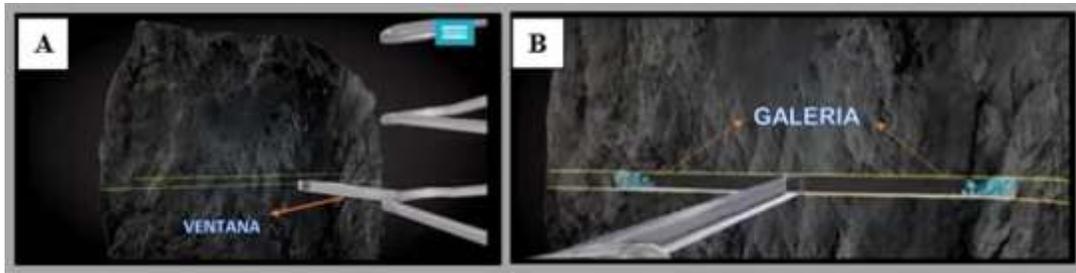


Figura 16. Apertura del nivel de explotación A) Ventana de acceso al nivel, B) Galería de acceso a las labores de explotación. (Departamento de Planeamiento Minero de la Mina El Roble, 2017).

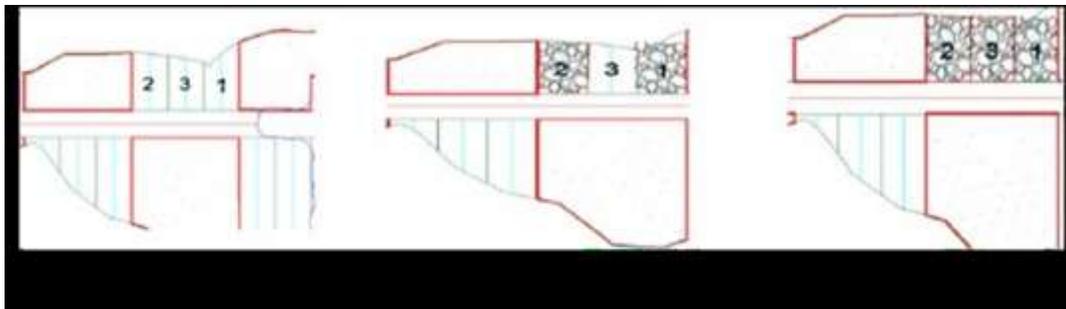


Figura 17. Secuencia de Minado en paneles: Se procede con la explotación del tajo uno, una vez finalizada se rellena y de igual forma se procede con el tajo dos y por último el tres (S.R.L.tda, 2017).

- **Segunda etapa:** consiste en la extracción de los paneles secundarios. Una vez explotados los paneles primarios de todos los niveles de un bloque, se accede nuevamente al nivel base para iniciar la explotación de los paneles secundarios siguiendo la misma metodología de la primera etapa de minado (Figura 18).
- **Tercera etapa:** es la última etapa de explotación del cuerpo Zeus y consiste en la explotación de todos los puentes minerales, esta etapa tiene la característica de que todas las labores de desarrollo y explotación deben situarse de forma transversal a sus correspondientes en los pisos superior e inferior.

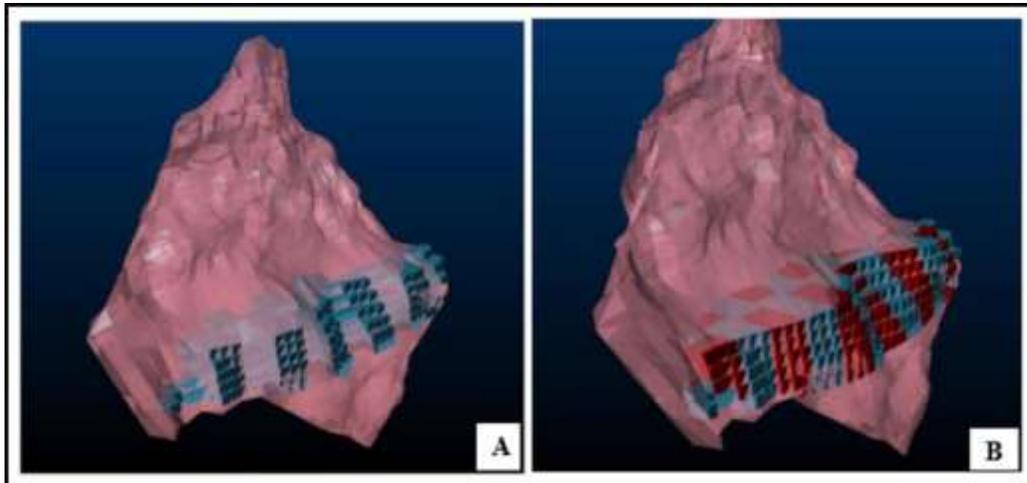


Figura 18. Método de minado aplicado al cuerpo Zeus. A) Paneles con sus tajos primarios. B) Paneles con sus tajos primarios y secundarios. (Departamento de Planeamiento Minero de la mina El Roble, 2017).

6.1.2. Aspectos importantes del método de minado.

Garantizar la eficiencia del método de minado depende de los siguientes aspectos:

- Los frentes deben llegar hasta los contactos con la roca caja (no se requiere dejar escudo).
- El tamaño de los frentes nunca debe exceder las dimensiones de 5 m x 5 m.
- Dos tajos abiertos nunca deben estar enfrentados.
- El llenado de los tajos con RDC se tiene que realizar hasta el tope de la labor es decir 5 m de alto.
- No se deben tocar los pilares y se deben conservar las dimensiones propuestas.

6.2.Ciclo de minado.

La Figura 19 describe el ciclo operacional de la mina El Roble, este consiste en 7 fases que inician después de la voladura de cualquier frente de avance:

- 1) Desate: el proceso de desate consiste en el perfilado de las labores derribando todos los bloques sueltos o sobresalientes, este procedimiento es mecanizado y se realiza por medio del *Skyler* (Maquinaria).

- 2) Descargue: en esta fase se retira todo el material de roca producto de la voladura y del proceso de desate.
- 3) Sostenimiento Inicial: Se realiza el lanzado de *shotcrete* para habilitar el ingreso de personal.
- 4) Actividades parciales: Incluye los procedimientos realizados por las áreas de topografía, geología y geomecánica en los frentes de las labores.
- 5) Perforación: se realizan los procedimientos de perforación con el fin de preparar el frente para el siguiente avance.
- 6) Soporte final: se completa el sostenimiento indicado por el área de geomecánica.
- 7) Voladura y carguío: Se carga el frente con explosivos y se realiza la nueva voladura, dando inicio nuevamente al ciclo de minado.

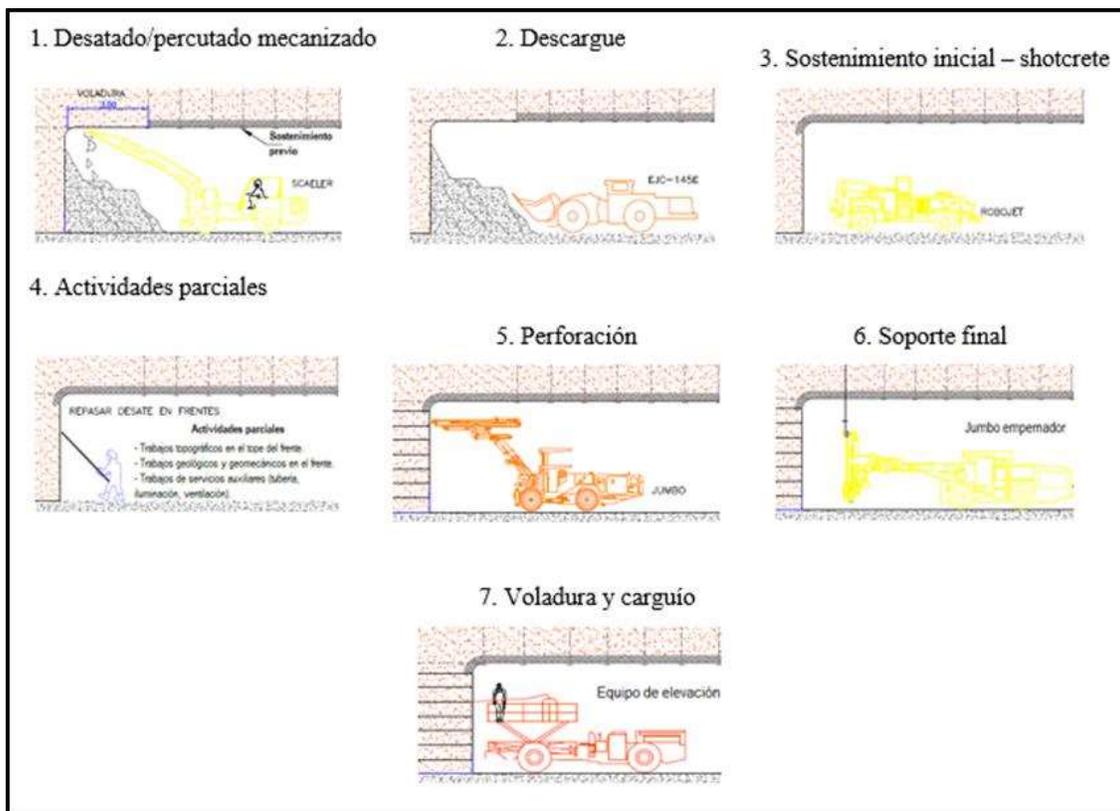


Figura 19. Ciclo de minado para la mina El Roble. (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble, 2017).



7. MARCO GEOLÓGICO

7.1. Estratigrafía regional

El yacimiento de la mina el Roble se encuentra dentro del marco geológico-estructural de la Cordillera Occidental de Colombia, las unidades que afloran en la zona de estudio corresponden al Grupo Cañasgordas, conformado por la Formación Barroso y la Formación Penderisco:

7.1.1. Formación Barroso

Esta unidad fue definida por Álvarez y González (1978) para denotar una serie de rocas volcano-sedimentarias constituidas por flujos de lava de composición basáltica seguidos por una secuencia de tobas, brechas y grauvacas. Esta unidad se localiza en el borde oriental de la Cordillera Occidental formando un cuerpo alargado en dirección N-S al occidente de la falla Cauca- Almaguer donde se encuentra en contacto con las diabasas de San José de Urama (Rodríguez y Arango, 2012). Rodríguez y Zapata (2013) le asignan una edad Cenomaniano–Turoniano basados en relaciones estratigráficas, registros fósiles en las sedimentitas y datos radiométricos.

7.1.2. Formación Penderisco

Álvarez y González (1978) definieron esta unidad sedimentaria como de origen marino y la dividieron en el Miembro Urrao y el Miembro Nutibara, ambos reposan discordantemente sobre la Formación Barroso. El Miembro Urrao corresponde a una secuencia de origen marino de composición calcáreo-silíceo, conformado principalmente por lutitas y arcillolitas intercaladas con areniscas y bancos de conglomerados en contacto transicional el Miembro Nutibara, este último constituido principalmente por cherts oscuros y calizas masivas de colores claros (Guzmán y Villarruel, 2005). En cuanto a su edad recientemente Guzmán y Villarruel (2005) extienden la edad del Miembro Nutibara al Paleógeno inferior con base en restos de Nummulites.

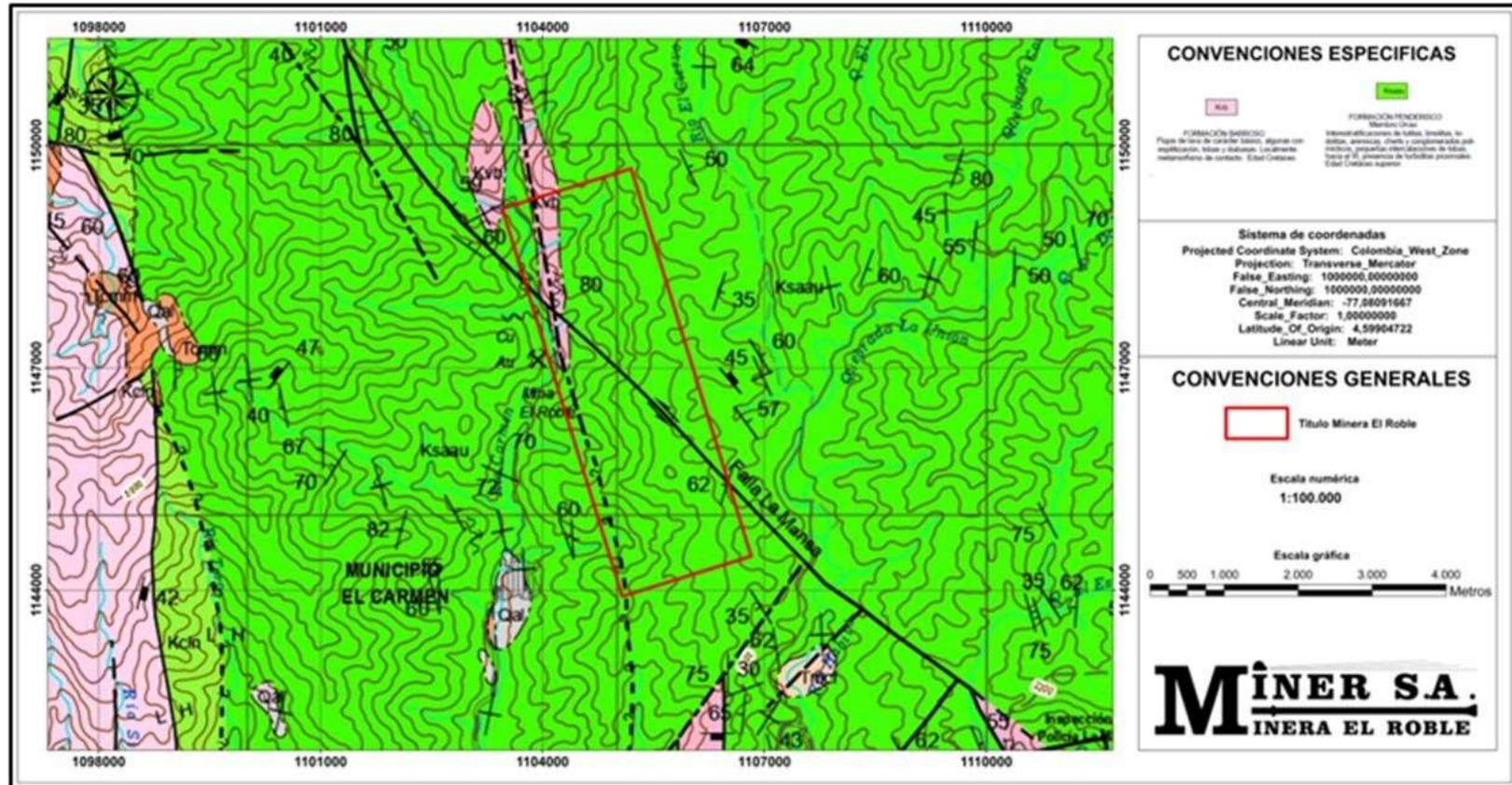


Figura 20. Mapa geológico regional, el rectángulo rojo encierra la extensión del título minero El Roble, modificado de Calle y Salinas, 1986



Estas unidades de roca fueron deformadas en el Cretácico Superior durante su acreción al continente y posteriormente intruidas por una serie de diques de composición andesítica (Kelly, 2021) (Figura 20). La temporalidad de estas unidades se extiende entonces desde el Cretácico Superior (Formación Barroso y Formación Penderisco) hasta el Neógeno (Intrusivos andesíticos).

7.2. Geología local

En el área del título minero de la mina El Roble se presentan una serie de rocas de origen volcánico y sedimentario pertenecientes al Grupo Cañasgordas, entre las que se encuentran los basaltos de la Formación Barroso y los sedimentos de la Formación Penderisco, dentro de esta última se dispone concordante el cuerpo de sulfuro, y una serie de diques de composición andesítica que cortan las unidades presentes en el área de explotación. Según Kelly (2021) este distrito minero puede dividirse en cuatro dominios litológicos: 1) basaltos; 2) chert negro; 3) chert gris; y 4) secuencia sedimentaria. Sin embargo, en este informe se plantea la modificación de estos, unificando como un solo dominio los cherts negros y los grises, debido a que sus características geológicas y geomecánicas son muy similares. De igual forma se incluyen como dos nuevos dominios la acumulación de sulfuro masivo y las andesitas, ya que corresponden a dos unidades que se presentan de manera muy significativa dentro de la secuencia local del área de explotación, además, para efectos de este estudio su presencia corresponde a cerca del 70% de las unidades de roca presentes en el nivel 1712. Estos dominios son descritos de base a techo según las observaciones realizadas en campo de la siguiente manera (Figura 21).

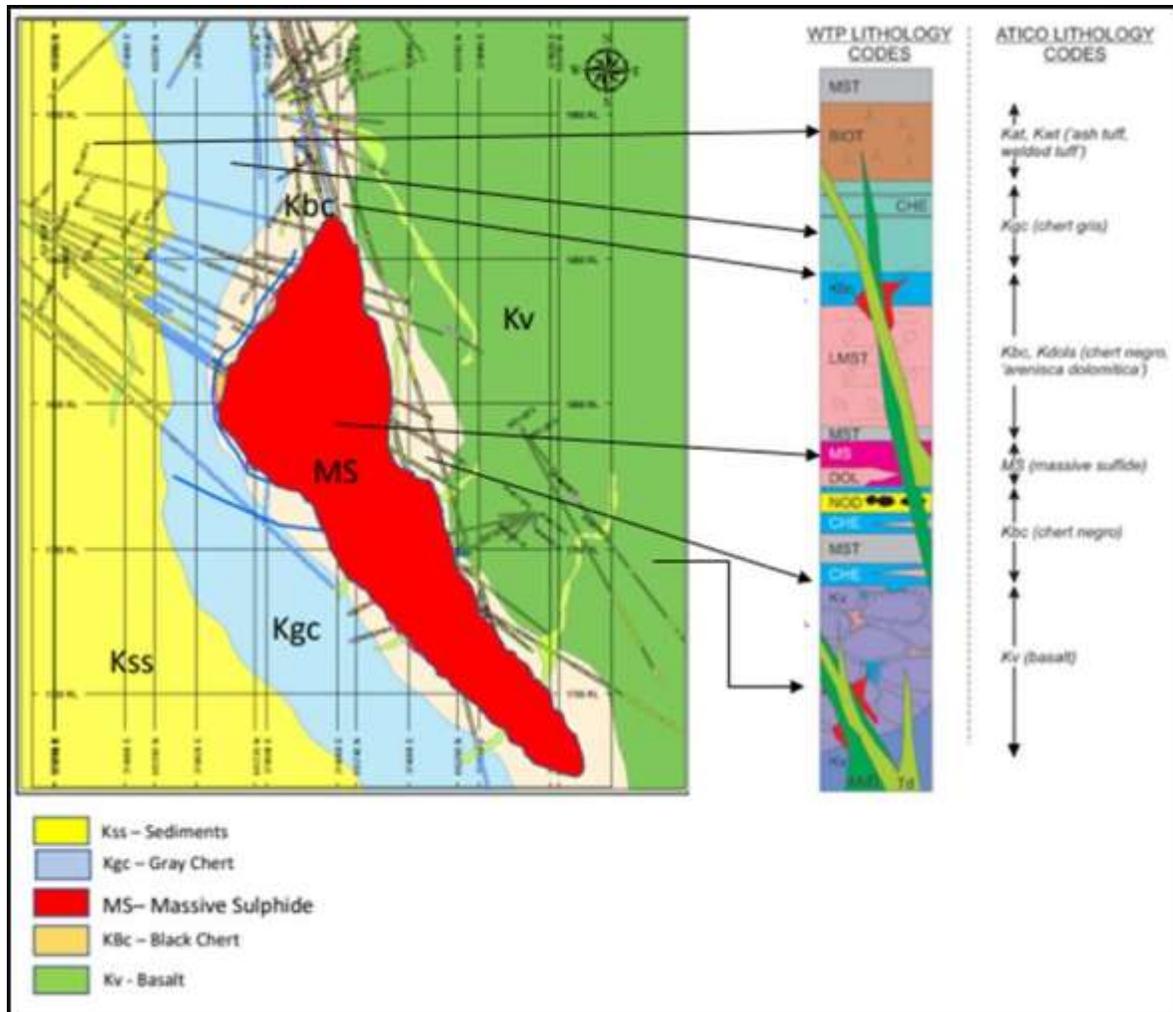


Figura 21. Geología local del yacimiento El Roble modificado de Kelly (2018) (Original sin escala).

7.2.1. Basaltos (Kv)

Hacen parte de la Formación Barroso y representan el basamento del yacimiento. Esta unidad se puede observar en la rampa principal de acceso y aflorando sobre todos los avances realizados en las ventanas de acceso a los niveles sobre la zona oriental del yacimiento. Se presenta en formas masivas y almohadilladas, con tonalidades grises y verdosas producto de alteración a minerales de clorita y epidota; presenta principalmente texturas afaníticas (Figura 22).



Figura 22. Basalto (MB, nomenclatura utilizada por el área de geomecánica). A) basalto. B) basalto con tonalidad verdosa producto de minerales de alteración (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble).

7.2.2. Chert (Kbc y Kgc)

Yace sobre los basaltos, se presenta de tonalidades grises (Kgc) y negras (Kbc), esta unidad conforma la roca caja del depósito; el chert negro envuelve los lentes de sulfuro que conforman el yacimiento y su presencia marca el punto final de las labores de extracción (Tajos). Se encuentra en algunos sectores laminado, con fractura típica concoidea, sin contenido fósil, con algunos diseminados de pirita, calcopirita, patinas de carbonato y contenido de materia orgánica (Figura 23).

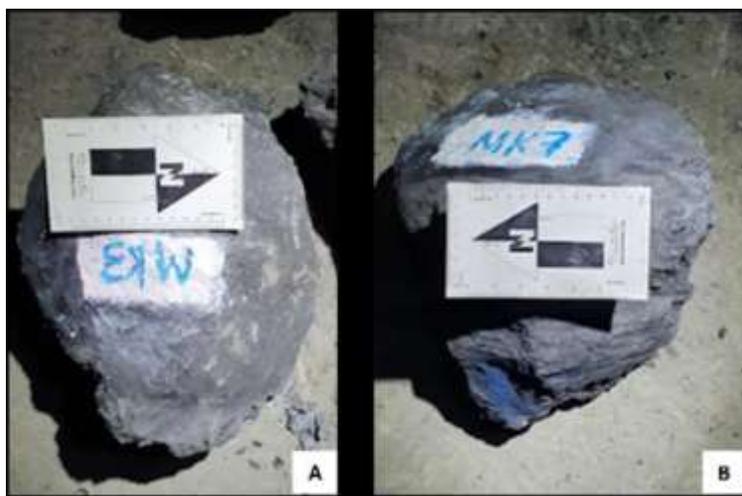


Figura 23. Cher gris (MK, nomenclatura utilizada por el área de geomecánica). A) chert gris masivo. B) chert gris laminado (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble).

7.2.3. Sulfuro Masivo (MS)

Es la unidad de interés económico dentro del yacimiento, representa una serie de cuerpos producto del desmembramiento de un cuerpo original, específicamente el cuerpo Zeus presenta una morfología lenticular, está compuesto principalmente por pirita, calcopirita anhedrales y en menor proporción cristales de magnetita y pirrotina subhedrales a anhedrales; presenta una tonalidad dorada producto del elevado porcentaje de los dos primeros minerales en mención (Figura 24).



Figura 24. Sulfuro semi-masivo (MM, nomenclatura utilizada por el área de geomecánica) (Departamento de Geomecánica de la Mina El Roble).

7.2.4. Secuencia sedimentaria (SS)

A la parte más superficial del yacimiento, se presenta una secuencia sedimentaria conformada principalmente por interestratificaciones de areniscas con cherts de tonalidades grises y negras y bancos menores de conglomerados. Las areniscas se caracterizan por presentar un tamaño de grano fino a medio, tonalidades gris verdoso a marrón, carbonosas, mal seleccionadas, clastos

angulares a subangulares principalmente de cuarzo, feldspatos y líticos de origen volcánico (Calle y Salinas,1986). Esta unidad conforma parte de la rampa de acceso y el crucero en el nivel 1880 de la mina.

7.2.5. Diques andesíticos

Se incluye como dominio litológico para el yacimiento de la mina El Roble en este informe, aunque no constituye una unidad estratigráfica abarca cerca del 10% del depósito (Espinal-Corrales, 2020). Esta unidad se encuentra intruyendo toda la secuencia geológica del distrito minero; los diques presentan espesores centimétricos a métricos; la roca es de textura afanítica y en algunos sectores porfirítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y biotita; en una masa de carácter hipocristalina, presenta tonalidades blancas a grisáceas y localmente es silicificado (Figura 25). Brito *et al.* (2010) le asignan una edad de cristalización Miocena entre 16 y 17 M.a, basados en dataciones U-Pb y Ar-Ar en circones.

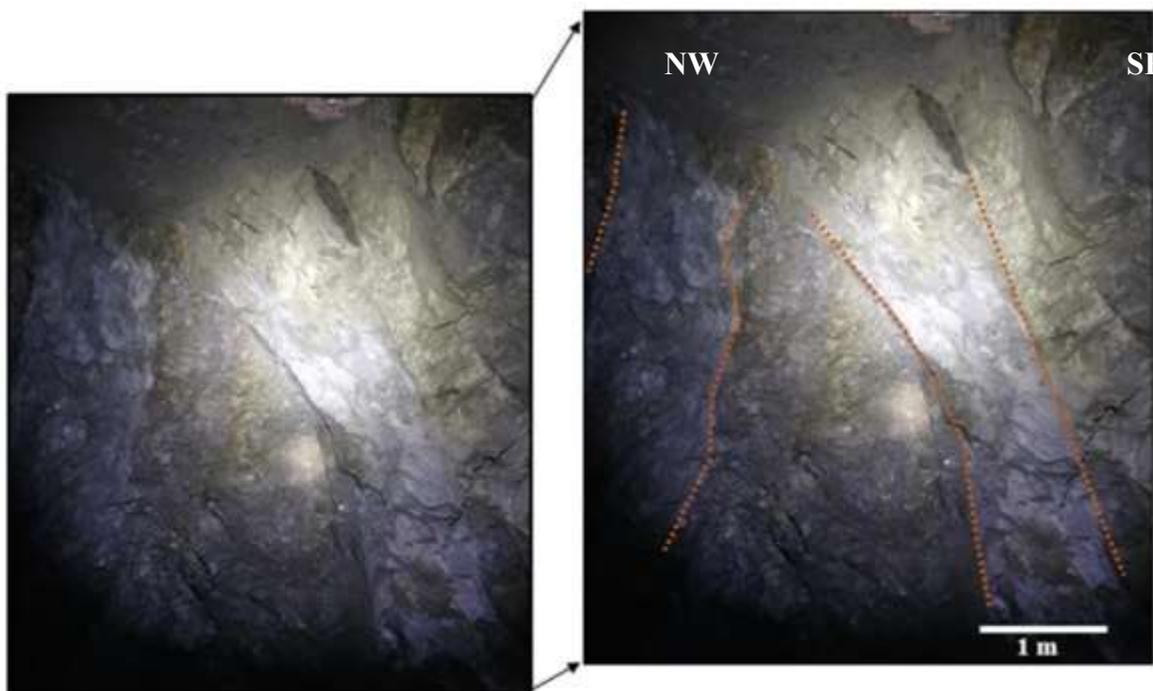


Figura 25. Intrusión de dique andesítico en un macizo de sulfuro (Fuente propia).

Es de destacar de la geología local en el yacimiento, la presencia importante de minerales como el jaspe cuya presencia en las litologías suele estar asociado a elevadas durezas de la roca, lo que aumenta la calidad del macizo, la existencia de grandes bancos de magnetita anhedrales a subhedrales y la disposición de un sistema de venas y betillas de composición calcárea y silícea principalmente, las cuales se encuentran atravesando la geología de este yacimiento.

7.3. Mineralización

La mineralización principal es de sulfuros masivos y semimasivos constituidos por pirita, calcopirita y en menor cantidad pirrotina, esfalerita y tetraedrita como minerales de la ganga junto con cuarzo, clorita, calcita y hematita con estructuras masivas, brechoide, bandeada, en venillas y *stockworks*. Dentro de los cuerpos de sulfuro se presentan zonas enriquecidas en Cu y otras enriquecidas en Au, conformando cuerpos mineralizados lenticulares entre 50 y 150 m de largo y espesores entre los 20 y 50 m. Los minerales de ganga son primordialmente cuarzo, clorita, epidota, calcita, y hematita (Figura 26) (Echeverri y Salas, 2017).



Figura 26. Testigos de perforación del pozo ATDHR-04, a 6.5% Cu y 17.6 g/t Au en el cuerpo de sulfuros masivos “Maximus”. (Echeverri y Salas, 2017).

7.4. Alteración

Dentro del yacimiento no se observa un patrón claro de alteración en la roca caja, pues no hay presencia de minerales característicos de alteración, sin embargo, en los diques se han caracterizado alteraciones de tipo propilítica, argílica y potásica; producto de circulación hidrotermal tardía (Echeverri y Salas, 2017).

7.5. Tipo de depósito

Como ya se ha dicho, el depósito de la mina El Roble corresponde a un sulfuro masivo que se encuentra emplazado de manera concordante dentro de una secuencia volcano-sedimentaria. Características como la afinidad tipo MORB de los basaltos, su estructura almohadillada, los contenidos elevados de Cu, Au y los valores menores de Zn y Pb, además, el bajo espesor de las facies terrígenas, son características que permiten relacionar este yacimiento con los depósitos ofiolíticos del “tipo Chipre” (Ortiz, 1990) (Figura 27).

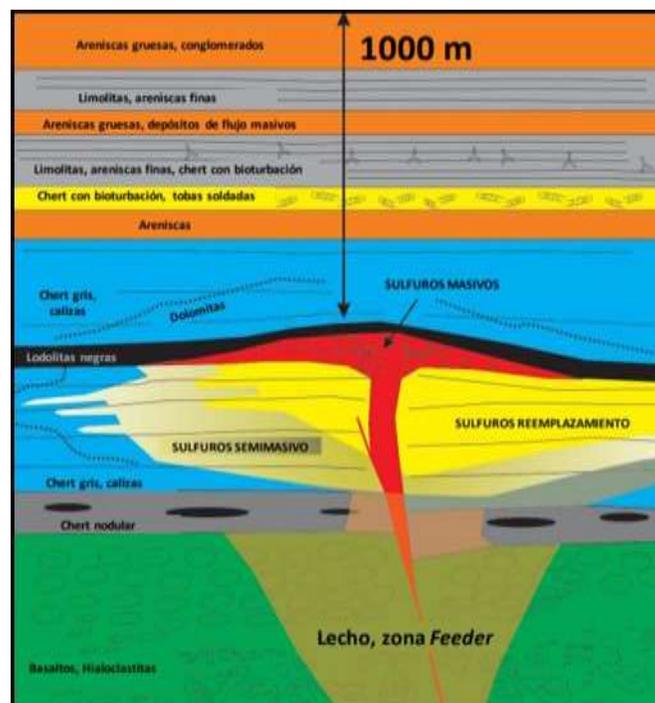


Figura 27. Modelo VMS idealizado del depósito de la mina El Roble (Espinal-Corrales 2020).

7.6. Geología Estructural

Producto de la acreción al continente del Grupo Cañasgordas, se marcan los lineamientos de una falla regional (falla La Mansa) que atraviesa en dirección NW el depósito de El Roble y que controla tectónicamente la secuencia litológica del yacimiento, generando una serie de cuerpos lenticulares de dimensiones diferentes de lo que alguna vez fue un único cuerpo de sulfuro masivo. Estos cuerpos se encuentran fuertemente plegados, fracturados y deformados por fallas locales (Figura 28) (Kelly, 2021).

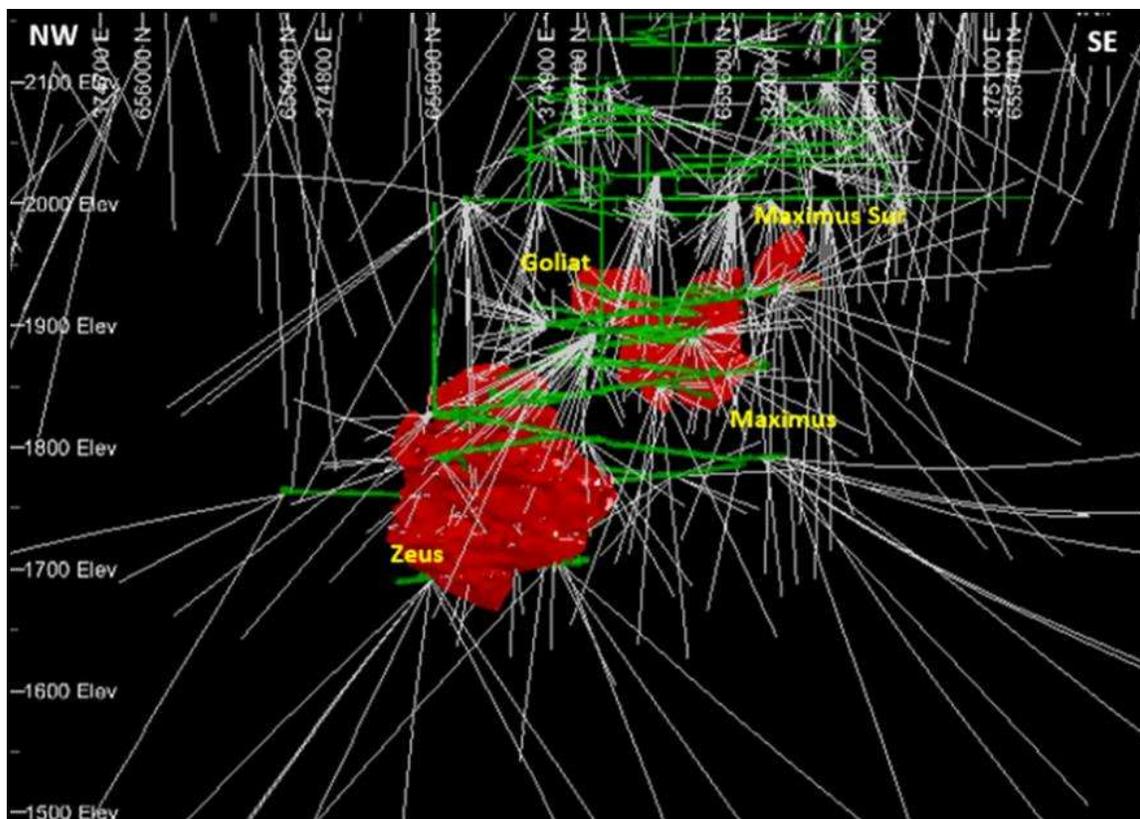


Figura 28. Distribución de cuerpos de sulfuros masivos. Las líneas blancas corresponden a las perforaciones históricas realizadas por Miner S.A para la delimitación de los cuerpos de sulfuro, las líneas verdes marcan el trazo de los sectores desde donde se han realizado dichas perforaciones (Kelly 2021).



7.6.1. Estructuras regionales

De manera regional, El depósito es controlado principalmente por la falla La Mansa, igualmente se describen a continuación otras estructuras de importancia en la zona (Figura 29).

7.6.1.1. Falla La Mansa

Es una estructura con dirección N-NW que buza al este, de carácter normal con un posible componente en rumbo sinistral asociado a la existencia de cuerpos lenticulares de basalto, chert y sulfuros (Calle y Salinas, 1986). Las evidencias de su trazo son principalmente fuertes deslizamientos, control de drenaje en el río Bolívar y zonas de cizallamiento intenso dentro de la mina El Roble (Arboleda *et al.*, 2009).

7.6.1.2. Falla de San Francisco

Falla de rumbo de tipo sinistral, con dirección NE-E y buzamientos entre 40 y 70 grados, se evidencia por expresiones morfo-tectónicas como alineamiento de valles, silletas laterales y pequeños desplazamientos en la monzodiorita de Farallones (Arboleda *et al.*, 2009., Espinal-Corrales, 2020).

7.6.1.3. Falla San Lorenzo

Esta estructura Atraviesa el depósito al extremo este de la zona de estudio, pero su control estructural es menos marcado en el área de la concesión minera. Esta falla presenta una dirección N-NW, su movimiento es de tipo inverso con buzamientos de alto grado al este, estructuralmente es responsable de una serie de cabalgamientos en los basaltos de la Formación Barroso sobre rocas del Miembro Urao de la Formación Penderisco (Espinal-Corrales, 2020).

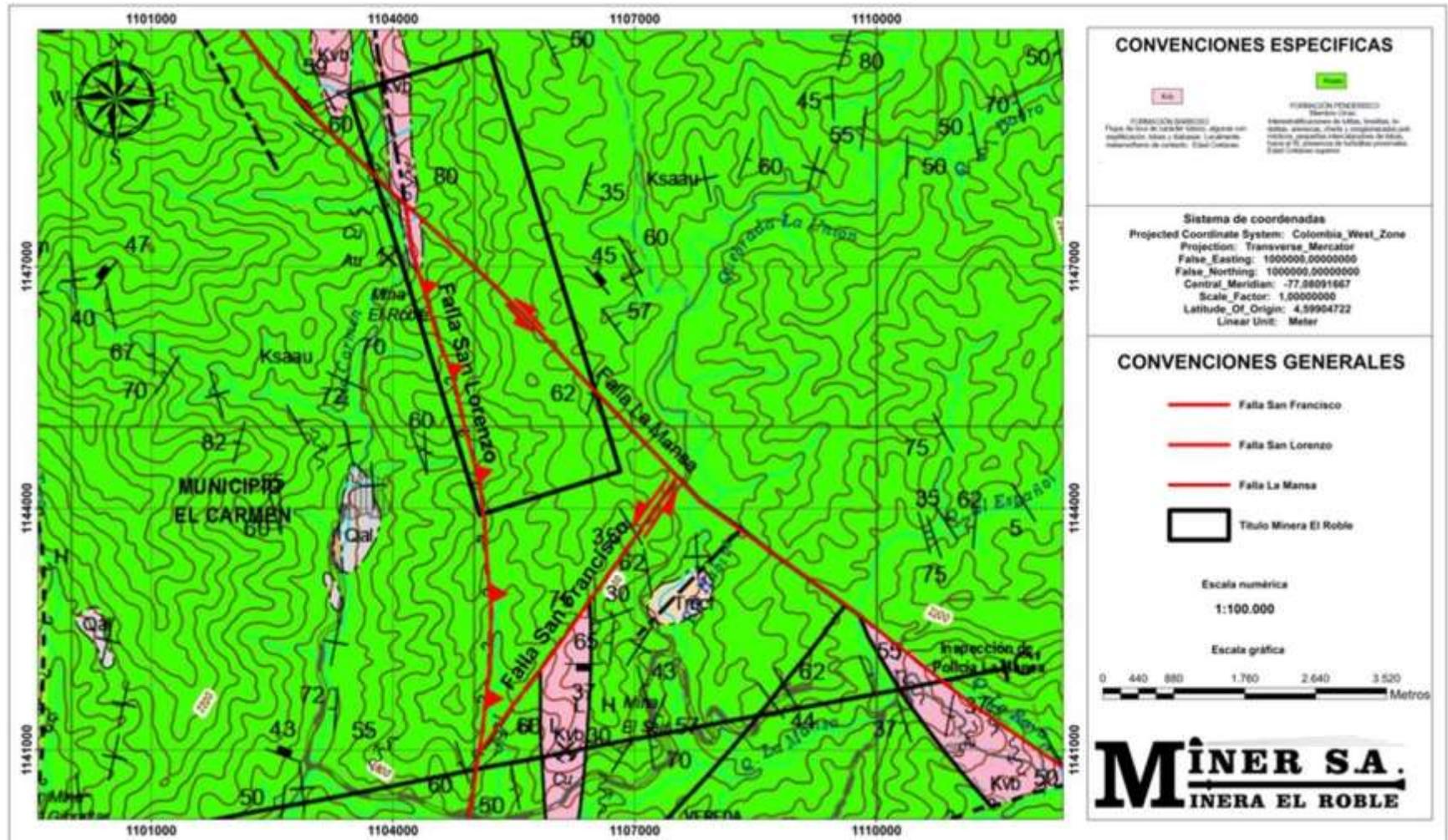


Figura 29. Fallas de carácter regional con influencia sobre el yacimiento de la mina El Roble (Modificado del modificado por Espinal-Corrales (2020) de Calle y Salinas (1986).



7.6.2. Estructuras Locales

De manera local el yacimiento de la mina El Roble se encuentra fuertemente deformado, la litología hospedante y el VMS parecen haber sido volcados con alto buzamiento al este y aparentemente en contacto fallado con los sedimentos subyacentes de la Formación Penderisco (Martínez, 2019). A partir del trabajo realizado en campo dentro de la mina, se observaron una serie de estructuras que evidencian el sometimiento de este depósito a un régimen de deformación frágil-dúctil, caracterizado por la presencia de fallas locales, plegamientos, estructuras tipo budín y diaclasamiento. Estas características se intensifican hacia las zonas de contacto entre el sulfuro y el chert negro donde la roca se observa triturada y fuertemente deformada.

7.6.2.1. Fallas

El depósito presenta fallas locales que persisten a lo largo de algunos metros y otras que presentan continuidad a lo largo de todo el cuerpo de sulfuros; dentro de la secuencia se observan fallas con componentes de buzamiento tanto normal como inverso de alto y de bajo ángulo para ambos componentes. Los contactos fallados entre el chert negro y la roca caja generan condiciones de alta inestabilidad dentro de los niveles debido al aumento del fracturamiento y la deformación, además de las superficies que se forman y que favorecen el deslizamiento de los bloques de sulfuro. Estas estructuras se identifican fácilmente por el desplazamiento de bloques y por las superficies estriadas producto de la fricción generada por el movimiento entre los bloques de roca (Figura 30).

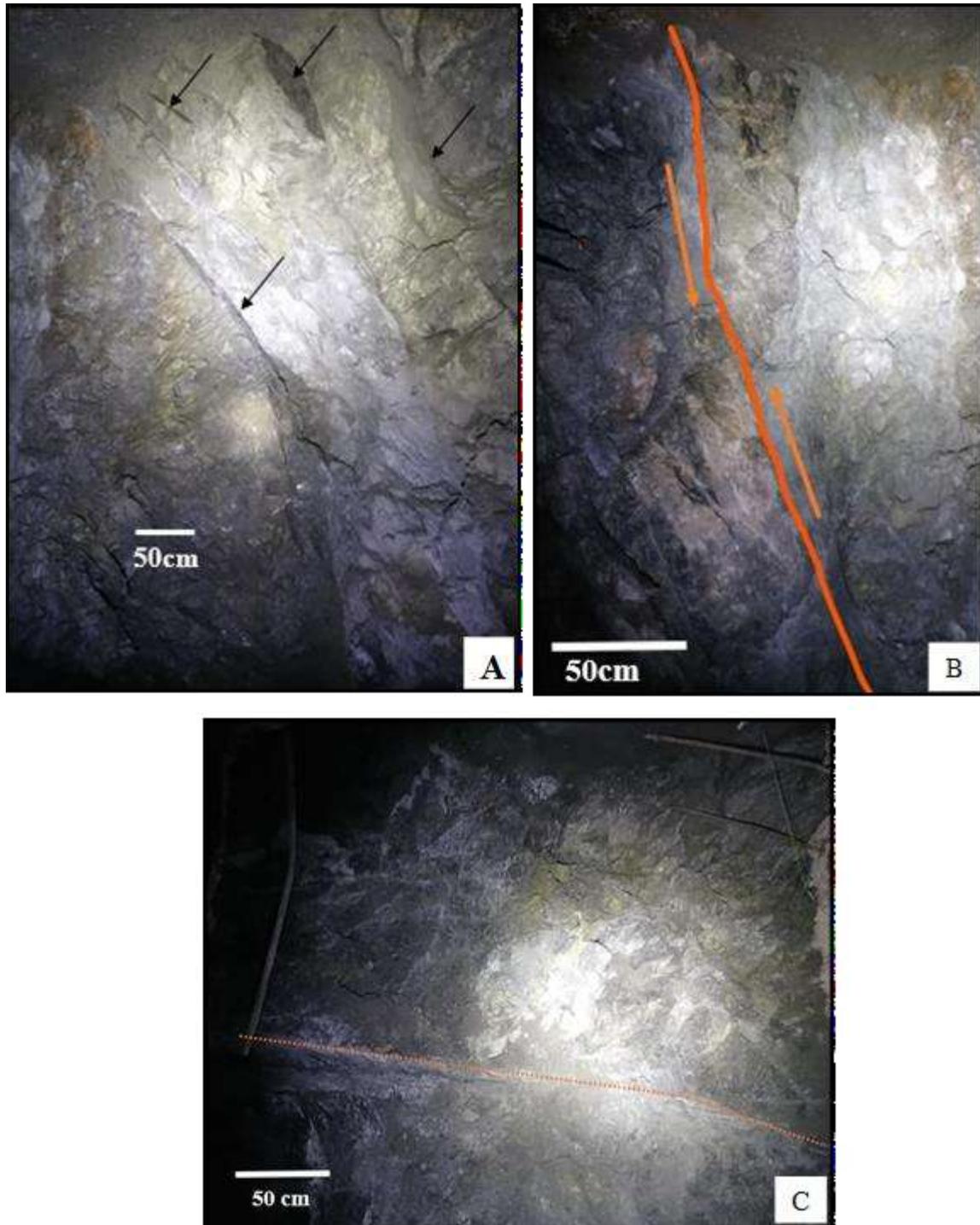


Figura 30. Fallas al interior de la mina A) Superficies estriadas. B) Falla de carácter inverso de alto ángulo desplazando dos bloques de sulfuro. C) Falla normal de bajo ángulo en zona de contacto entre el sulfuro y el chert negro (Fuente propia).

7.6.2.2. Pliegues

Los pliegues encontrados corresponden a pliegues asimétricos del orden de centímetros, desarrollados principalmente sobre el chert en zonas de cizalla intensa hacia los contactos con el sulfuro masivo. Sin embargo, según lo planteado por Espinal-Corrales (2020) en El Roble es común encontrar estilos de plegamiento cerrados y abiertos tipo *chevron* y *kink*, además de pliegues por propagación de falla presentes en el chert y en el sulfuro, producto de esfuerzos compresivos sobre estas litologías de diferente competencia (Figura 31).

7.6.2.3. Deformación en Blastos de sulfuro

En la zona de estudio es común encontrar zonas de cizalla intensa con masas de sulfuro embebidas en capas de roca menos competente como el chert negro, formando estructuras lenticulares, tipo budín o exhibiendo estructuras tipo *pinch and swell* (Figuras 31-32).

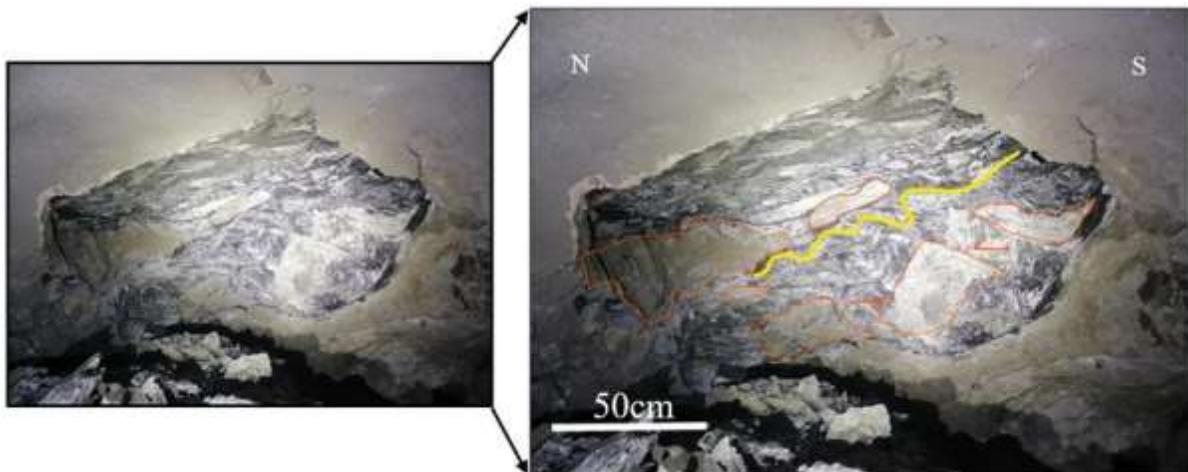


Figura 31. Zona de cizalla con pliegues asimétricos y blastos de sulfuro embebidos en rocas de chert negro, uno de los blastos deformados exhibe un movimiento sinestral (Fuente propia).

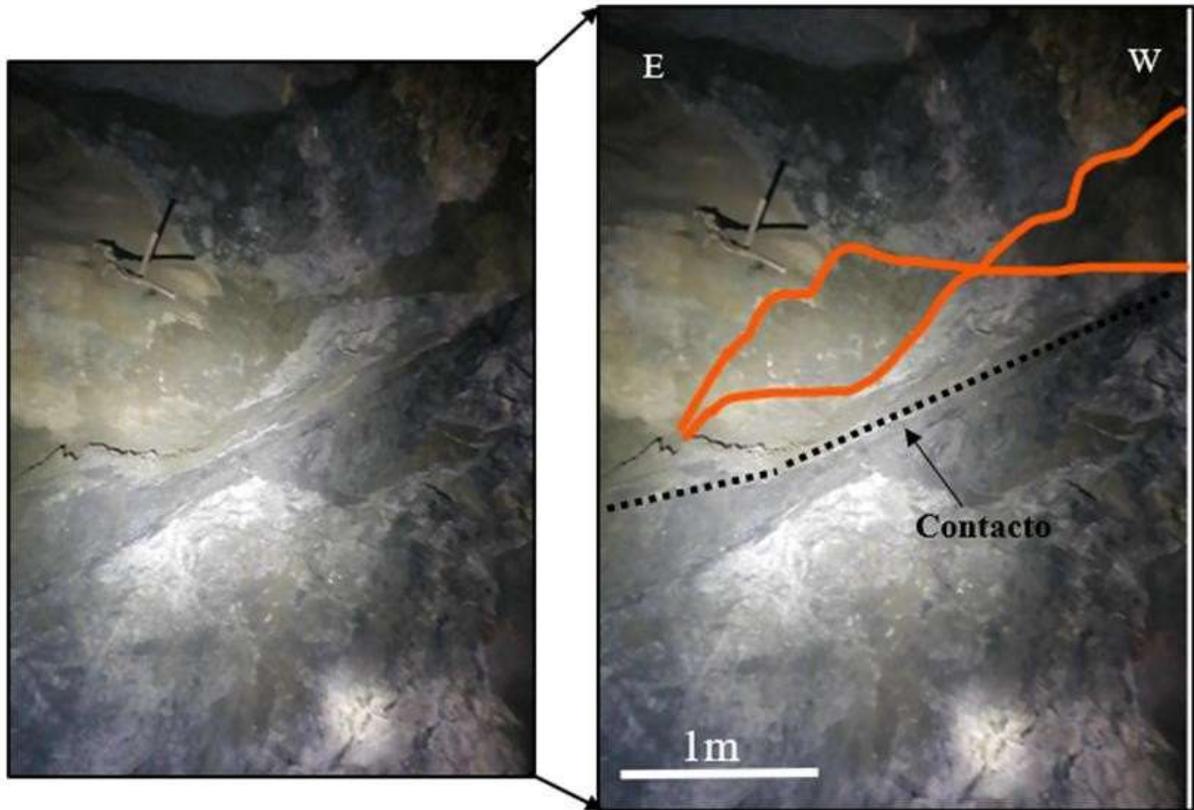


Figura 32. Zona de contacto fallado entre sulfuro y chert negro, en la cual se aprecia una estructura *pinch and swell* en el sulfuro. (Fuente propia).

7.6.2.4. Diaclasamiento

A causa del componente tectónico marcado en el yacimiento, las rocas presentan deformación frágil con zonas muy fracturadas e intensamente fracturadas que generan normalmente entre tres y cuatros familias de diaclasas sistemáticas con trazos continuos, orientación bien definida y uniformemente espaciadas; formando bloques y cuñas en los frentes, lo que favorece el realce de las labores (Figura 33).

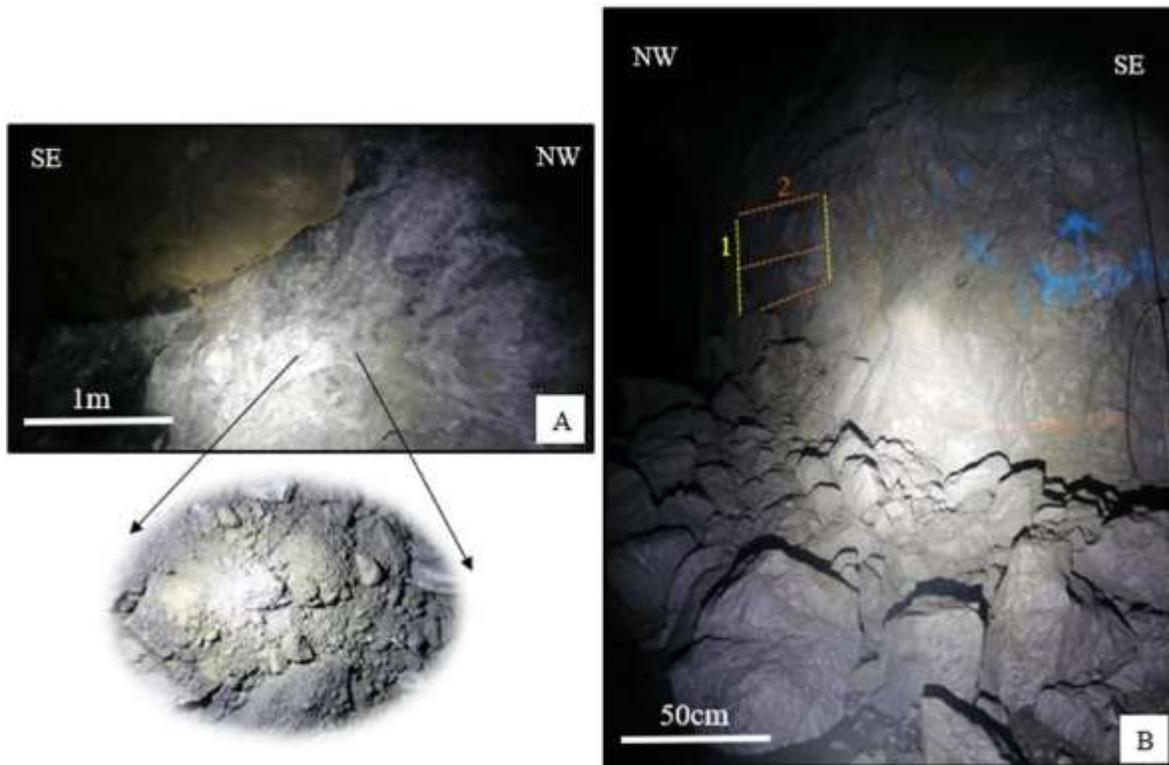


Figura 33. Diaclasamiento A) Macizo intensamente fracturado. B) Macizo con control estructural de dos familias de diaclasas que forman bloques de gran tamaño (Fuente propia).

7.7. Geología económica

Los minerales de mena que se aprovechan principalmente en el yacimiento son la calcopirita y el oro. Los tenores de cobre se presentan en promedio de 3.5 a 3.9% y el promedio del tenor de oro oscila entre los 1.8 y 2.2 g/tn. Aproximadamente el 94% de los recursos minerales medidos e indicados están contenidos en dos cuerpos VMS denominados: Zeus (86%) y Maximus (8%). Los otros cuerpos representan solo el 6% del recurso mineral. La extracción anual es de 280.000 toneladas de sulfuro, con una producción de concentrado de 36.000 toneladas anuales.



8. EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 1712

Para la caracterización geomecánica de los tajos primarios del nivel 1712, se recopiló la información siguiendo la metodología de Bieniaswski (1989) (RMR) y se realizó un registro de las estructuras deformativas frágiles (fallas y familias de diaclasas) presentes en la corona de las labores post-voladura, las cuales para fines de este estudio no fueron discriminadas y se tratarán en conjunto como discontinuidades, pues no se pretende realizar un análisis cinemático o estadístico de falla de los macizos. Finalmente, esta información se compiló en un mapa estructural.

En cuanto al diseño de sostenimiento recomendado en labores permanentes (ventanas y galerías) y temporales (tajos), se implementó el estándar de sostenimiento realizado por el área de geomecánica de minera El Roble, el cual es una modificación de la tabla GSI adecuada a las características geomecánicas que se pueden presentar en el depósito.

8.1. Mapeo geomecánico

Todos los datos estructurales tomados en campo fueron representados en un plano del nivel a medida que se daban los avances de las diferentes labores mineras, el resultado final de los mapeos en campo se encuentra representado en la Figura 34, la cual por densidad de datos, impide ver a simple vista el comportamiento estructural característico del área en estudio, el mapa a detalle se presenta en el Anexo 1. Por esta razón la Figura 34 solo servirá para hacer una idea global de la distribución de los datos estructurales tomados en campo, para ubicar las labores de interés (VE 1712, GA 1712 N, GA 1712 S, tajos y rampa de acceso) y para apreciar la traza del contacto entre el sulfuro y la roca caja (chert negro) que es de importancia en este informe en términos del sostenimiento recomendado.

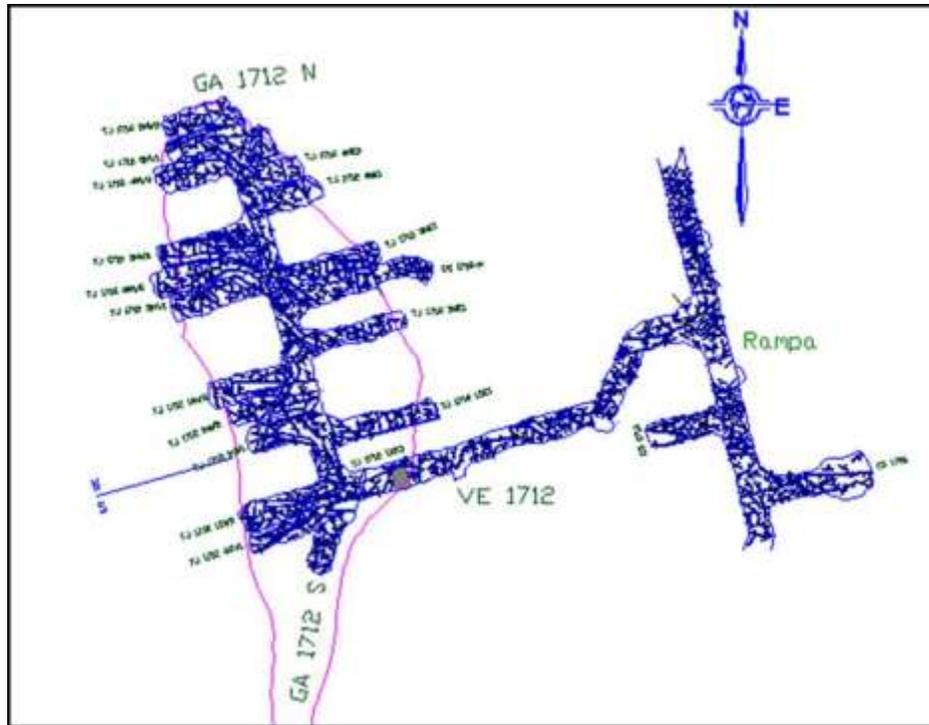


Figura 34. Mapeo estructural del nivel 1712, escala 1:600. Se observan las diferentes labores, datos estructurales (color azul) y la traza de contacto (línea rosa) (Departamento de geomecánica de la Mina El Roble).

8.2 Análisis estructural del macizo rocoso

Se recolectaron un total de 542 datos estructurales (Anexo 3) los cuales se esquematizaron en un plano del nivel y se procesaron estadísticamente a través del *software DIPS* obteniendo los siguientes resultados:

En la Figura 35-A se observa un diagrama de roseta en el cual se pueden ver las principales tendencias estructurales presentes en el nivel 1712. El 50% de los datos presenta una tendencia W-E, con algunas tendencias marcadas NWW-SSE y NEE-SWW; un 25% de los datos corresponde a estructuras con orientaciones predominantemente N-S y el 25% restante de los datos varía en tendencias menores con direcciones NW-SE y NE-SW. En el diagrama de contornos se pueden observar los lugares en los que existe una mayor concentración de polos,

con base en esto, se pueden establecer cinco familias de discontinuidades, una principal que presenta la mayor concentración de polos (FM 1) en porcentajes de 6 al 7% y cuatro secundarias (FM 2, FM 3, FM 4 Y FM5) con concentraciones menores del 3 al 4% (Figura 35-B). Las estructuras correspondientes a las cinco familias de discontinuidades establecidas, presentan las siguientes características: FM1) estructuras con orientación predominante al NEE-SWW y buzamientos casi verticales al SE; FM2) estas estructuras presentan una tendencia marcada W-E, con buzamientos que oscilan entre los 40° y los 60° en dirección N-S; FM3) Familia representada por aquellas discontinuidades presentes en el macizo con orientación predominantemente N-S y buzamientos de alto grado casi verticales; FM4) corresponde a la concentración de estructuras con tendencias principales de rumbo NNW-SSE y buzamientos de bajo ángulo menores a 45° al S-W; FM5) esta familia representa las tendencias estructurales con rumbos NE-SW con un alto ángulo de buzamiento al NW.

Los campos que ocupan las cinco familias de discontinuidades permiten generar un dato estructural representativo de cada zona, cuyos valores de rumbo y buzamiento son calculados de manera estadística por el *software Dips* (Tabla 2). Con estos nuevos datos estructurales generados, se presenta un estereograma (Figura 35-C) donde se presentan estas familias de discontinuidades de interés a través de planos estructurales.

La Figura 35-C presenta todos los planos estructurales conjugados para las cinco familias de discontinuidades más representativas marcadas en este informe, en un mismo estereograma; lo que permite deducir que la tendencia de las familias secundarias respecto a las principales muestra un comportamiento similar de rumbos en las familias 2 y 5 con tendencias marcadas E-W, por el contrario, las familias 3 y 4 difieren de esta tendencia de rumbo, mostrando direcciones más marcadas en dirección N-S; en general para estas familias se mantienen altos buzamientos

por encima de los 50 grados a excepción de la familia 4 (Tabla 2). Según lo mencionado anteriormente, un aspecto importante a tener en cuenta es la intersección entre planos, lo que indica la formación de un número importante de cuñas, con alto potencial de falla favorecido por los altos buzamientos presentes en estas familias.

Tabla 2. Datos estructurales representativos de las 5 familias de discontinuidades (Fuente propia).

FAMILIA	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5
<i>Dip/dip direction</i>	85/173	54/180	85/265	35/249	70/335

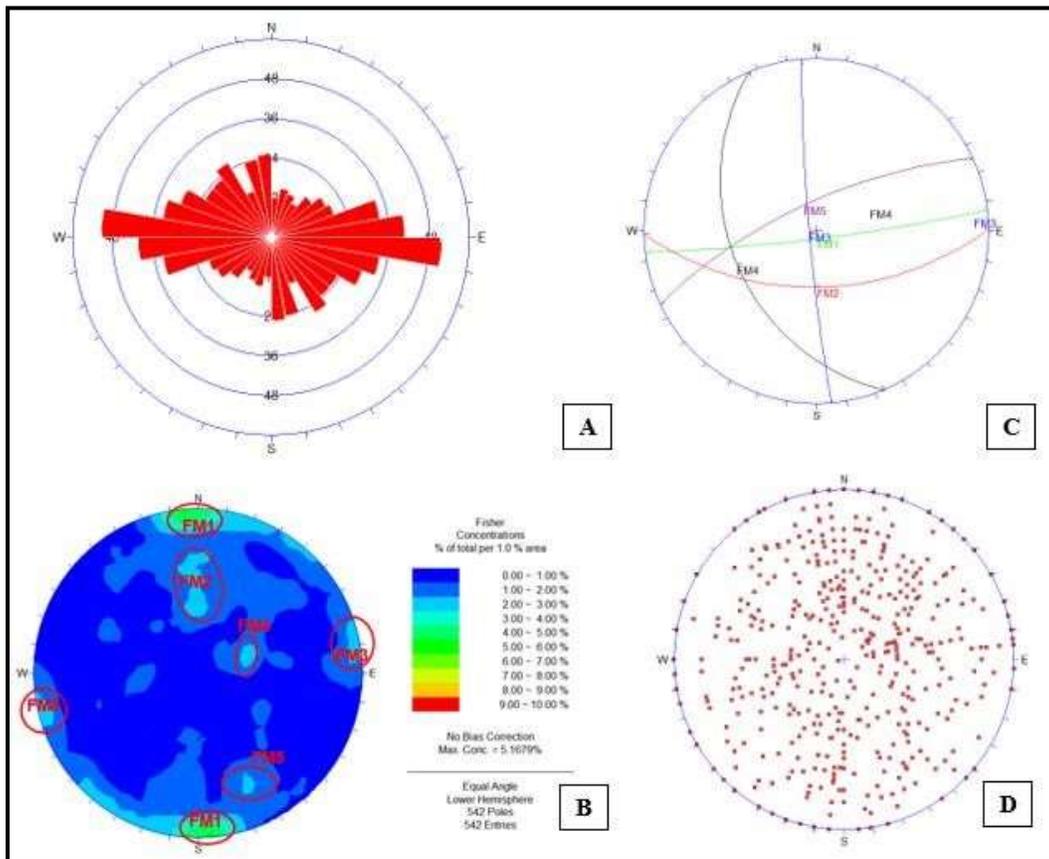


Figura 35. Diagramas estadísticos generados en el software *Dips*. A) Diagrama de roseta, donde se puede observar la tendencia general de las estructuras. B) Diagrama de contornos con las 5 familias de discontinuidades en color rojo. C) planos principales de las 5 familias de discontinuidades. D) Diagrama de polos correspondientes a los 542 datos estructurales tomados para las discontinuidades presentes en el nivel 1712 de la mina El Roble.



8.3. Caracterización RMR del macizo rocoso

8.3.1. Litología

El nivel 1712 se caracteriza por la presencia de cuatro litologías: basalto, chert negro, sulfuro masivo y diques andesíticos. La distribución espacial de este paquete litológico, está dada por el basalto ubicado hacia la parte más oriental del depósito, sobre el cual se desarrolla la rampa principal y las ventanas de acceso al cuerpo Zeus, el chert negro se encuentra rodeando todo el sulfuro, el sulfuro se caracteriza por la presencia de pirita anhedral acompañada de calcopirita y otros sulfuros secundarios como magnetita y pirrotina. Por otro lado, los diques son de composición andesítica con formas tabulares, y espesores variables entre centímetros y metros. La operación minera se desarrolló en el nivel principalmente a lo largo de estos cuerpos de roca.

8.3.2. Resistencia

Para determinar el valor de resistencia de las diferentes rocas encontradas, se pueden emplear ensayos de laboratorio como el de resistencia a la compresión uniaxial y/o carga puntual en testigos, pero para efectos del trabajo en campo dentro de la mina y por ser un método más práctico y fácil de manejar, se utilizó como guía la Tabla 3, adaptada por el departamento de geomecánica y con la cual se establece un rango de resistencia de la roca en Megapascales (MPa) en carga puntual y a la compresión uniaxial, con lo cual se logra obtener una valoración o rating. Como ya se indicó, la determinación del rating en las labores se realizó a partir del número de golpes con el martillo geológico aceptados por la roca antes de fracturarse (carga puntual), los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4 para las diferentes litologías observadas en el avance de las labores dentro del nivel 1712.

Tabla 3. Tabla con valores Rating para clasificación RMR según valores de resistencia de la roca. Modificado de Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.

Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	>25	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Puntaje o Rating (RMR)	15	12	7	4	2	1	0

Tabla 4. Resistencia de las diferentes litologías en el nivel 1712 (Modificado de Gutierrez-Hernandez, 2019).

Litología	Descripción	Golpes de picota	Resistencia (Mpa)	Puntaje o Rating
Basalto	Débil	1 golpe	5.0 - 25	2
	Medianamente dura	1-2 Golpes	25 - 50	4
Chert negro	Medianamente dura	1-2 Golpes	25 - 50	4
Sulfuro	Medianamente dura	1-2 Golpes	25 - 50	4
	Roca dura	2-3 Golpes	50 - 100	7
	Roca muy dura	3 - 4 Golpes	100 - 250	9
Dique	Medianamente dura	1-2 Golpes	25 - 50	4
	Roca dura	2-3 Golpes	50 - 100	7

8.3.3. RQD

Para efectos del trabajo de campo donde no se dispone de núcleos de perforación, se puede estimar el RQD con la cantidad de fisuras presentes en 1 m³ utilizando la siguiente relación (Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018).

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad J_v: \text{cantidad total de diaclasas por m}^3$$

Con base en lo anterior, para establecer el valor del RQD en los avances, se debe examinar el macizo rocoso en el techo de la labor con el fin de identificar las zonas que presentan un mayor fracturamiento, una vez identificado se estima un metro lineal (se asume que la cantidad obtenida se mantiene en las otras dos dimensiones) y se procede a realizar el conteo de fracturas presentes

en el (N°Fract/MI). De esta manera, para determinar el RQD (%) se emplea la tabla estandarizada por el departamento de geomecánica (Tabla 5), en ella se ubica el número de fracturas por metro lineal (N°Fract/MI) de cada roca en la primera fila y el valor del RQD (%) será el valor inmediatamente inferior. Cuando el número de fracturas ocupa un rango de valores como es el caso de este análisis, el RQD (%) será el promedio de los datos proyectados en la fila dos. Los resultados se pueden observar en la columna tres de la Tabla 6.

Finalmente, para determinar el puntaje o *rating* a utilizar para el cálculo del RMR, se utilizó el ábaco de la Figura 36, los resultados se encuentran registrados en la columna 4 de la Tabla 6.

Tabla 5. Relación del número de fracturas con el RQD. (Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotécnia - CCGG, 2018)

N° Fract / MI	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
RQD %	98	95	92	89	85	82	79	75	72	68	66	62	59	56	52	49	46	42	39	36

Tabla 6. Resultados de RQD determinados para las diferentes litologías del nivel 1712 modificado de Gutierrez-Hernandez, 2019.

Litología	N° Fract / MI	RQD (%)	Puntaje o <i>rating</i>
Basalto	20-22	45	9
	16-18	59	11.6
Chert negro	18-22	49	9.8
	21-24	41	8.3
Sulfuro	15-18	61	11.8
	18-20	52	10.4
	>24	<30	5
Dique	14-16	65	12.9
	20-22	45	9.1

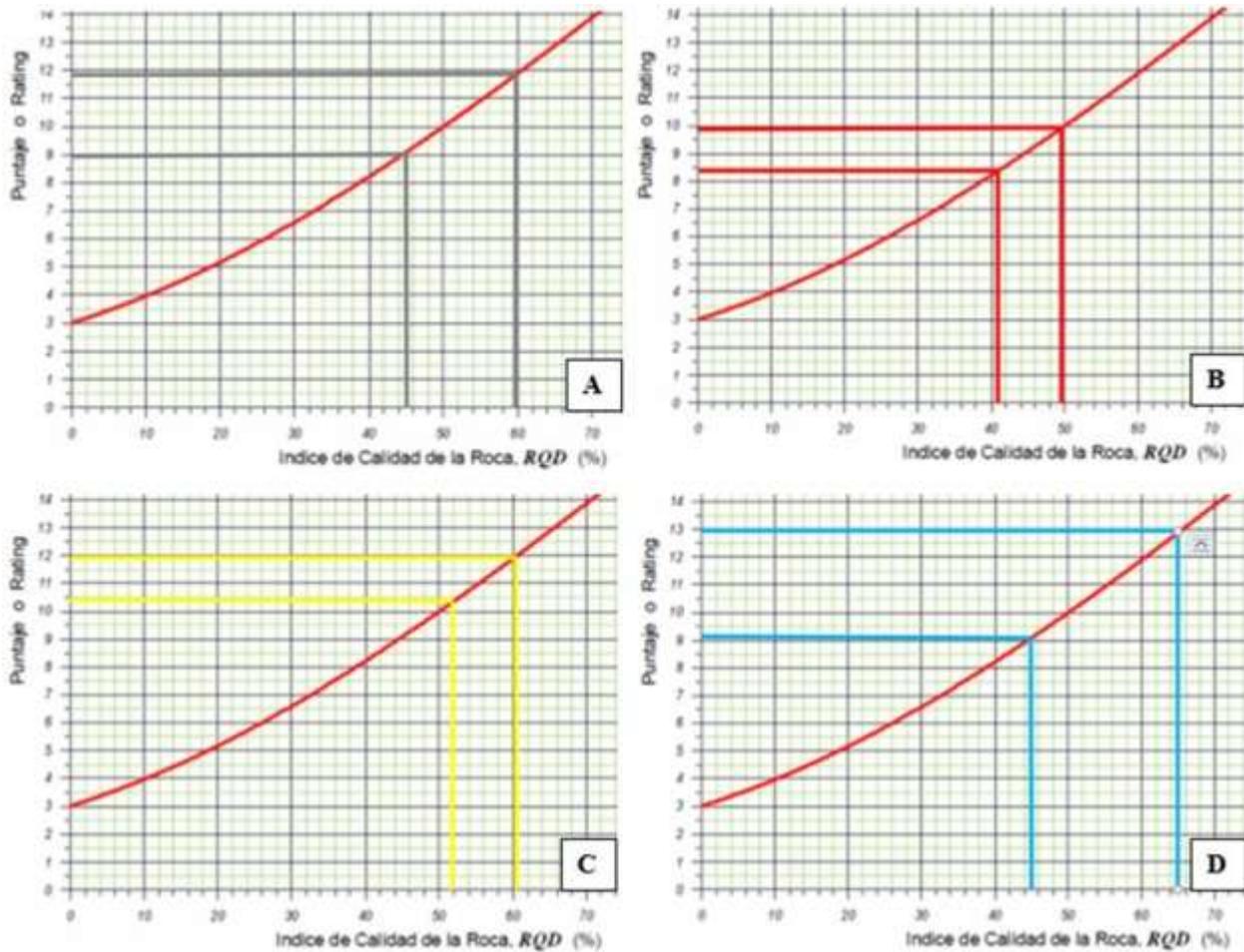


Figura 36. Puntaje o *Rating* según el valor del RQD. A) Basalto (línea gris), B) Chert (línea roja), C) sulfuro (línea amarilla) D) dique (línea azul), modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.

8.3.4. Espaciamiento de las discontinuidades

Los espaciamientos encontrados sobre el macizo rocoso en los avances generados en el nivel 1712 son cortos; oscilan entre los 10 mm en las litologías que se presentan intensamente fracturadas y los 150 mm en rocas con un grado de fracturamiento menor; por ejemplo: el dique presenta valores de espaciamiento que van desde los 40 mm en su estado de mayor fracturamiento; hasta los 150 mm en macizos bien consolidados, así mismo el chert negro arroja valores de espaciamiento mínimos de 10 mm en aquellas zonas donde se presenta intensamente

fracturado y valores hasta de 80 mm en áreas menos fracturadas y estables; siendo el dique y el chert los dos extremos de espaciamiento presente en el nivel 1712.

En frentes donde se presentan distancias con valores diferentes entre familias, se tomó un valor promedio entre los espaciamientos medidos, de tal manera que se pueda obtener un valor de espaciamiento general para el frente en evaluación; este valor debe ser coherente con el valor del RQD. Una vez identificado el valor del espaciamiento, se utiliza la gráfica de las Figuras 37 para obtener el puntaje o *rating* para este parámetro. Los resultados de los espaciamientos para las rocas del nivel 1712 se encuentran en la Tabla 7.

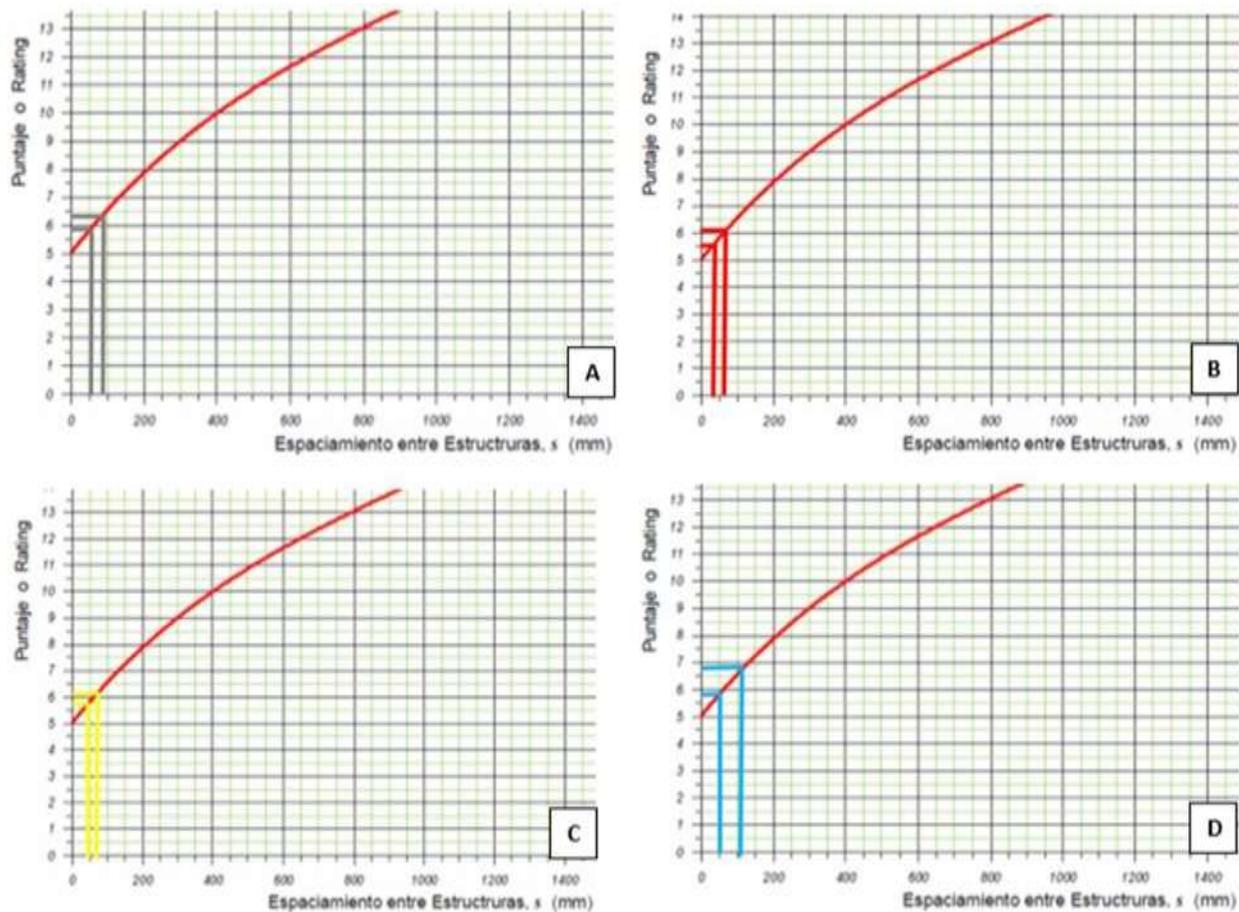


Figura 37. Gráfico para determinar el espaciamiento en mm. A) Basalto (línea gris), B) Chert (línea roja), C) sulfuro (línea amarilla) D) dique (línea azul), modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotécnica - CCGG, 2018.

Tabla 7. Resultados de los espaciamientos determinados para las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).

Litología	espaciamiento (mm)	promedio	puntaje o rating
Basalto	40-60	50	5.9
	60-100	80	6.3
Chert negro	40-80	60	6.1
	10 60	35	5.5
Sulfuro	30-60	45	5.6
	50-80	65	6.2
	<60	10	5
Dique	70-150	110	6.8
	40-60	50	5.6

8.3.5. Condición de las discontinuidades

La condición de las discontinuidades engloba cinco ítems de calificación geomecánica para macizos rocosos: persistencia, apertura, rugosidad, relleno y alteración; sus puntajes son obtenidos de acuerdo con los rangos establecidos originalmente para la caracterización de estos parámetros por Bieniawski (1989) (Tabla 8). A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras la evaluación de los macizos rocosos expuestos con los avances en el nivel 1712 de la mina El Roble y algunas particularidades de calificación estándar adecuadas por el departamento de geomecánica para este yacimiento en específico.

Tabla 8. Rangos de caracterización de macizos rocosos según la condición de las discontinuidades, planteado por Bieniawski (1989); en color rojo se pueden observar los puntajes asignados para cada rango. modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.

Rango de Valores											
Condición de las discontinuidades	Persistencia	<1m long	6	1-3 m	4	3-10 m	2	10 - 20 m	1	>20 m	0
	Apertura	Cerrada	6	< 0.1 mm	5	0.1 - 1 mm	4	1 - 5 mm	1	> 5 mm	0
	Rugosidad	Muy rugosa	6	Rugosa	5	Lig. Rugosa	3	Lisa	1	Espejo de falla	0
	Relleno	Limpia	6	Duro < 5 mm	4	Duro > 5 mm	2	Suave < 5 mm	1	Suave > 5 mm	0
	Alteración	Sana	6	Lig. Alterado	5	Mod. Alterado	3	Muy alterada	2	Descompuesta	0

8.3.5.1. Persistencia

Dentro de la operación se maneja un valor estándar de persistencia en todos los avances, el cual es de 3-10 m (Tabla 9), esto se fundamenta en que en promedio los avances de una labor posterior a la voladura, son de tres metros y a pesar de eso, se aprecia continuidad en las estructuras.

Tabla 9. Puntaje de la persistencia para las rocas de la mina el roble (Fuente propia).

Persistencia (m)	Puntaje o <i>Rating</i>
3-10	2

8.3.5.2. Apertura

En el nivel 1712 se presentan aperturas menores a 0.1mm principalmente en las rocas menos alteradas y de menor fracturamiento, por el contrario, en rocas muy alteradas y fracturadas, se observan aperturas mayores de 0.1 mm (Tabla 10).

El sulfuro presenta valores muy variables de Apertura, que van desde 0.1 mm a 5mm, por lo que se establece un valor promedio entre el puntaje otorgado a las rocas con valores de apertura entre 1 y 5 mm, y el puntaje de macizos rocosos con aperturas menores a 0.1 mm (Tabla 8)

Tabla 10. Rangos de aperturas presentes en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).

Litología	Apertura (mm)	Puntaje
Basalto	0.1 – 1	4
Chert negro	1-5	1
Sulfuro	0.1-5	3
Dique	0.1-1	4

8.3.5.3. Rugosidad

Este valor se establecerá como un promedio entre el puntaje otorgado a superficies lisas (1) y ligeramente rugosas (3) (Tabla 11), valor que predomina de manera general en todo el nivel 1712.

Tabla 11. Rugosidad en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).

Litología	Rugosidad (Superficies)	Puntaje o <i>Rating</i>
Basalto	Lisas y ligeramente rugosas	2
Chert negro		
Sulfuro		
Dique		

8.3.5.4. Rellenos

Los rellenos típicos hallados en este nivel, son los rellenos duros tipo silíceos y/o carbonatados mayores a 5 mm y los rellenos blandos arcillosos menores a 5 mm. Como puntaje para este ítem, se establece un promedio entre las dos condiciones, el cual aplica de manera general para este informe en todo el nivel 1712 (Tabla 12).

Tabla 12. Rellenos en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).

Litología	Rellenos	Puntaje o <i>Rating</i>
Basalto	Duros >5mm y blandos <5mm	1.5
Chert negro		
Sulfuro		
Dique		

8.3.5.5. Alteración

Aproximadamente el 35% del macizo en el nivel 1712 corresponde a un macizo ligeramente alterado y el 65% restante a roca con un grado de alteración moderado (Tabla 13).

Tabla 13. Alteración en las rocas del nivel 1712 (Fuente propia).

Litología	Alteración	Puntaje o <i>Rating</i>
Rocas del nivel 1712	Ligera	5
	Moderada	3

8.3.6. Agua subterránea

Este es un parámetro bastante importante en términos de estabilidad de cualquier macizo rocoso, puesto que acelera los procesos de descomposición y deterioro tanto de la roca como de los elementos de sostenimiento utilizados, además, actúa como lubricante entre las superficies de las discontinuidades, favoreciendo la falla de los macizos. El agua subterránea es una variable que puede presentarse en los macizos rocosos según lo establecido por Bieniawski (1989) en cinco estados: seco, húmedo, mojado, goteo y flujo, de los cuales los flujos de agua representan la condición menos favorable para la calidad de los macizos rocosos, por el contrario, un estado seco otorga las condiciones más favorables; los puntajes correspondientes a cada estado de este criterio se encuentran en la Tabla 14.

Como estándar dentro de la operación en el cuerpo Zeus, se maneja una roca tipo húmeda con un *rating* de 10, pero se debe prestar especial atención en zonas donde se presenten goteos o flujos constantes de agua, con el fin de reforzar el tipo de sostenimiento implementado. Para el caso puntual del nivel 1712, durante los avances de extracción de los tajos primarios no se observó flujo de agua en ninguna de las labores en avance, por lo que se mantiene el estándar para las rocas de este nivel (Tabla 15).

Tabla 14. Valoración del macizo rocoso según el parámetro de agua subterránea planteado por Bieniawski (1989); en color rojo se pueden observar los puntajes asignados para cada rango. modificado de: Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.

Agua subterránea	Seco	15	Húmedo	10	Mojado	7	Goteo	4	Flujo	0
------------------	------	----	--------	----	--------	---	-------	---	-------	---

Tabla 15. Agua subterránea en el nivel 1712 (Fuente propia).

Litología	Agua subterránea	Puntaje o <i>Rating</i>
Rocas del nivel 1712	Húmedo	10



8.4. Calculo del RMR

Identificados todos los parámetros necesarios para el cálculo del RMR de las rocas en el nivel 1712, se hizo la sumatoria de todas las calificaciones utilizando el formato recomendado por el Centro Geotécnico Internacional y adaptado por el departamento de geomecánica de la Mina el Roble, para la caracterización del macizo rocoso. De acuerdo con los diferentes parámetros tomados en campo y los puntajes calculados, se observa que una misma litología se puede clasificar en dos o hasta tres tipos de macizo diferente, hablando en términos de calidad; esto demuestra que los diferentes macizos, aunque correspondan a una misma litología presentan respuestas reológicas diferentes ante la deformación, o bien, que algunas zonas han sido sometidas a condiciones de esfuerzos mayores, tiempos de intemperismo variables, perturbaciones antrópicas de mayor embergadura y circulación de fluidos continua en comparación con zonas próximas; generando que existan macizos de menor calidad, intensamente fracturados y alterados, y macizos de mejor calidad con condiciones más favorables de fracturamiento y alteración en terrenos de poca extensión.

De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las litologías presentes en el nivel: dos valores de RMR para el basalto, clasificado en Basalto Tipo 1 (RMR 39.4) y Basalto tipo 2 (RMR 47.4) , lo cual los clasifica como macizos rocosos tipo IVA y IIIB; dos puntajes globales de RMR para el chert, Chert Tipo 1 (RMR 42.4) y Chert Tipo 2 (RMR 37.3), valores que corresponde a macizos tipo IIIB y IVA respectivamente; tres valores de RMR para el sulfuro, Sulfuro Tipo 1 (RMR 36.5), Sulfuro Tipo 2 (RMR 45.5) y Sulfuro Tipo 3 (RMR 52.3), macizos del tipo IVA, IIB y IIIA respectivamente; y dos valores de RMR para los diques, Dique Tipo 1 (41.2) y Dique Tipo 2 (52.2), macizos tipo IVA y IIB. De acuerdo con los resultados obtenidos y las clases de macizo descritas en la tabla 16, los macizos representados por las litologías presentes en el nivel 1712 de la mina el roble

corresponden a macizos de regular y mala calidad, es decir, macizos inestables, de baja resistencia, muy fracturados, deformados y alterados, que representan condiciones críticas para la estabilidad de cualquier operación que se desarrolle en ellos, por lo que deben ser reforzados con sistemas de sostenimiento que logren la estabilidad de estas masas de roca.

Tabla 16. Clases de macizos rocosos según los valores de RMR (Bieniawski, 1989), modificado de Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotecnia - CCGG, 2018.

Clase de macizo	Descripción	RMR
I	Excelente calidad	100-81
II	Buena calidad	80-61
IIIA	Regular calidad	60-51
IIIB	Regular calidad	50-41
IVA	Mala calidad	40-31
IVB	Mala calidad	30-21
V	Muy mala calidad	20-0

Si se observan los valores de RMR calculados para el basalto (Tabla 17), se determinó que en términos de calidad se encuentran dos tipos de basalto, los cuales han sido denominados Basalto Tipo 1 y Basalto Tipo 2. El Basalto Tipo 1 es un basalto de calidad más baja, que presenta un alto fracturamiento, una resistencia baja y un grado de alteración mayor que el Basalto Tipo 2, por esta razón para su estabilización es necesario un sostenimiento de mayor capacidad.

Tabla 17. Puntaje RMR para el basalto (Fuente propia).

Criterio		
Litología	Basalto Tipo 1	Basalto Tipo 2
Resistencia	2	4
RQD	9	11.6
Espaciamiento	5.9	6.3
Persistencia	2	2
Apertura	4	5
Rugosidad	2	2
Relleno	1,5	1,5
Alteración	3	5
Agua subterránea	10	10
VALOR RMR	39.4	47.4
CLASE DE MACIZO	IVA	IIIB

Para el chert negro los valores de RMR, representan en términos de calidad dos clases de macizo rocoso (IIIB y IVA), al igual que en el basalto se han denominado Chert Tipo 1 y Chert Tipo 2 (Tabla 18). El Chert Tipo 2 es el chert de más baja calidad, presenta un fracturamiento intenso y aperturas del orden de 5 mm, lo que genera que las labores que avanzan en esta clase de macizo presenten un tiempo de autosostenimiento menor y tiendan al realce, por lo que se hace necesario dentro de la operación dar prioridad de sostenimiento.

Tabla 18. Puntaje RMR para el chert negro (Fuente propia).

Criterio		
Litología	Chert Tipo 1	Chert Tipo 2
Resistencia	4	4
RQD	9.8	8.3
Espaciamiento	6.1	5.5
Persistencia	2	2
Apertura	4	1
Rugosidad	2	2
Relleno	1,5	1,5
Alteración	3	3
Agua subterránea	10	10
VALOR RMR	42.4	37.3
CLASE DE MACIZO	IIIB	IVA

Para el sulfuro presente en el nivel 1712, se observan tres clases de macizo (IIIA, IIIB y IVA) establecidos por tres valores diferentes de RMR; los cuales se clasifican en este informe como Sulfuro Tipo 1, Sulfuro Tipo 2 y Sulfuro Tipo 3. El Sulfuro Tipo 1 corresponde al macizo de calidad más baja, debido a su fracturamiento intenso, en ocasiones trituramiento y a su baja resistencia, a diferencia de los Sulfuros tipo 2 y 3 que presentan valores de resistencia más altos y un grado de fracturamiento menor, por lo cual los macizos representados por Sulfuro Tipo 1 necesitaran de diseño de sostenimiento de mayor capacidad que los macizos que avanzan en Sulfuro Tipo 2 y Sulfuro Tipo 3 que presentan una mejor calidad y alcanzaran su estabilidad más fácilmente.

Tabla 19. Puntaje RMR para el sulfuro (Fuente propia).

Criterio			
Litología	Sulfuro Tipo 1	Sulfuro Tipo 2	Sulfuro Tipo 3
Resistencia	4	7	9
RQD	5	10.4	11.6
Espaciamiento	5	5.6	6.2
Persistencia	2	2	2
Apertura	4	4	5
Rugosidad	2	2	2
Relleno	1,5	1,5	1.5
Alteración	3	3	5
Agua subterránea	10	10	10
VALOR RMR	36.5	45.5	52.3
CLASE DE MACIZO	IVA	IIIB	IIIA

Los diques de composición andesítica presentes en el nivel 1712, se pueden clasificar en dos macizos con calidad diferente: Dique Tipo 1 y Dique Tipo 2, clasificados según el criterio RMR como macizos clase IVA y IIIB respectivamente. El Sulfuro Tipo 1 representa el macizo de menor calidad en esta litología, presenta baja resistencia e intenso fracturamiento, factores que generan una alta inestabilidad y demandan sistemas de sostenimiento de mayor capacidad en las labores que avanzan sobre este tipo de roca.

Tabla 20. Puntaje RMR para los diques andesíticos (Fuente propia).

Criterio		
Litología	Dique tipo 1	Dique tipo 2
Resistencia	4	7
RQD	9.1	12.9
Espaciamiento	5.6	6.8
Persistencia	2	2
Apertura	4	5
Rugosidad	2	2
Relleno	1,5	1,5
Alteración	3	5
Agua subterránea	10	10
VALOR RMR	41.2	52.2
CLASE DE MACIZO	IVA	IIIB

8.5. Clasificación de las rocas según el criterio GSI

Para clasificar las rocas siguiendo el criterio de Hoek y Marinos (2000), es necesario categorizar el fracturamiento y la condición física del macizo rocoso, por lo cual es importante tener presentes las Tablas 21-22.

Tabla 21. Grado de fracturamiento (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía., 2004).

Nº fracturas/m	Clasificación
6-11	Fracturado
12-20	Muy fracturado
>20	Intensamente fracturado

Tabla 22. Condición de resistencia y propiedades de las discontinuidades modificado de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y energía (2004) por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017).

Condición	Clasificación
Buena	(Muy resistente, fresca). Superficies de discontinuidades muy rugosas e inalteradas, fracturas cerradas. Rompe con varios golpes de picota (más de 3 golpes) (Rc 100 a 250 MPa)
Regular	(Resistente, levemente alterado). Discontinuidades rugosas, ligeramente abiertas (menor a 1cm), relleno duro. Levemente alterado con manchas de oxidación. Se rompe con 1 a 2 golpes de pica (Rc 50 a 100 MPa).
Pobre	(Moderadamente Alterado). Discontinuidades lisas o con estrías, moderadamente abiertas (entre 1cm a 5cm). Roca con Alteraciones Arcillosas moderadas. Relleno deleznable. Se indenta superficialmente con golpes de pica (1 a 5mm) y a un máximo de 1 golpe de picota (Rc 25 a 50 MPa).
Muy pobre	(Blanda, muy alterada), Discontinuidades pulidas o con estrías muy abiertas (mayor a 5cm). Relleno suave y arcillosos. Muy alterado. Se indenta más de 5 mm (Rc 5 a 25 Mpa).

En términos de clasificación según el criterio GSI de Hoek y Marinos (2000), para el nivel 1712 se presentan dos tipos de macizos: macizos de tipo IF/R (intensamente fracturados de condiciones regulares) y de tipo MF/R (muy fracturados de condiciones regulares) (Tabla 23).

Tabla 23. Valores de RMR y su respectiva clasificación GSI calculada para las diferentes rocas presentes en el nivel 1712 (Fuente propia).

Litología	RMR	GSI
Basalto tipo 1	39.4	IF/R
Basalto tipo 2	47.4	MF/R
Chert tipo 1	42.4	MF/R
Cher tipo 2	37.3	IF/R
Sulfuro tipo 1	36.5	IF/R
Sulfuro tipo 2	45.5	MF/R
Sulfuro tipo 3	52.3	MF/R
Dique tipo 1	41.2	IF/R
Dique tipo 2	52.2	MF/R

8.6. Recomendaciones de sostenimiento

De acuerdo con la clasificación GSI, se determinó el tipo de sostenimiento, los elementos y el espaciamiento entre los mismos que se debían ejecutar sobre las diferentes labores de avance en el nivel, esto siguiendo los parámetros establecidos en la tabla GSI modificada por el área de geomecánica de Minera El Roble S.A. Los nombres de los elementos se encuentran abreviados de la siguiente manera: *shotcrete* (SH), perno helicoidal (PH), *split set* (SS), malla (M), enfilajes (ENF); los valores que aparecen en la tabla GSI como por ejemplo “1,2 x 1,2m” hacen referencia a la distancia en la que deben ser instalados los elementos del sostenimiento. Por otro lado, los términos Gdt (gradiente) y Bov (bóveda) hacen referencia al lugar hasta donde debe instalarse el elemento de sostenimiento; siendo el gradiente el punto sobre los hastiales de la labor a un metro del piso, y la bóveda el lugar donde finalizan los hastiales en su parte más alta y comienza el arco

de la labor (Figura 38). Una vez determinado el tipo de sostenimiento se realizó un mapa de zonificación geomecánica, basado en la paleta de colores de la Tabla 24 y la clasificación RMR de los macizos descritos (Anexo 2).

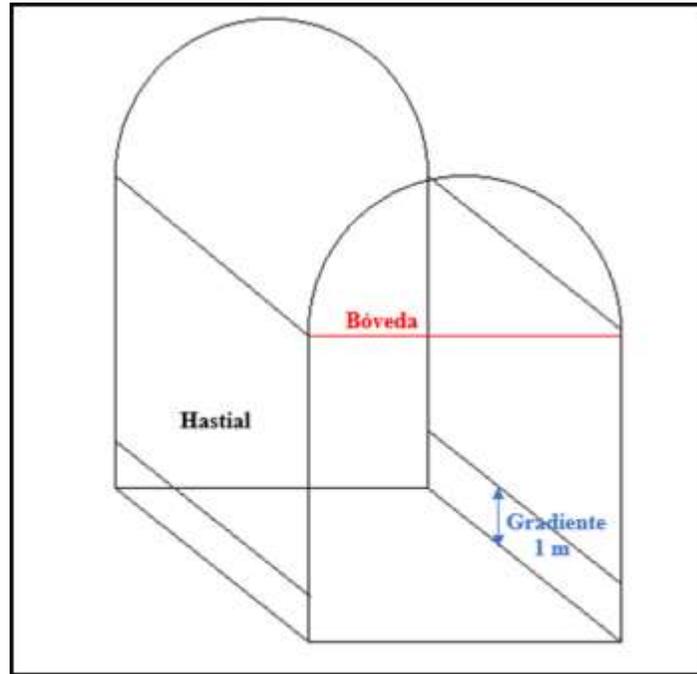


Figura 38. Partes de un túnel, sobre las cuales se delimita la instalación de los diferentes elementos de sostenimiento (Fuente propia).

Tabla 24. Paleta de colores según puntajes de RMR utilizados para las zonificaciones geomecánicas del cuerpo Zeus. Fuente (Fuente propia).

RMR	COLOR
20-30	
30-40	
40-50	
50-60	

Es necesario aclarar que, para las recomendaciones de sostenimiento, no se tuvo presente la corrección por orientación de las discontinuidades, esto debido a que por agilidad dentro de la operación se ha observado que, para este cuerpo, el cálculo funciona bien sin necesidad de aplicar la corrección, lo que facilita y acelera el proceso que debe ser lo más ágil y dinámico posible. Sin embargo, el geomecánico encargado si debe tener presente en campo si la labor presenta o no un control estructural importante, con el fin de reforzar el sostenimiento indicado por el cálculo de las clasificaciones RMR y GSI.

8.6.1. Labores permanentes

8.6.1.1. Ventana 1712 (VE 1712)

Los avances realizados sobre la ventana de acceso, siguen cinco tipos de macizos representados por Basalto Tipo 1 y Tipo 2 (desde la parte inicial hasta la zona de contacto con el chert negro), Dique Tipo 2 en la (zona media), Chert Negro Tipo 2 (hasta la zona de contacto con el sulfuro) y en Sulfuro Tipo 1 (hasta la zona donde se abre la galería) (Figura 39).

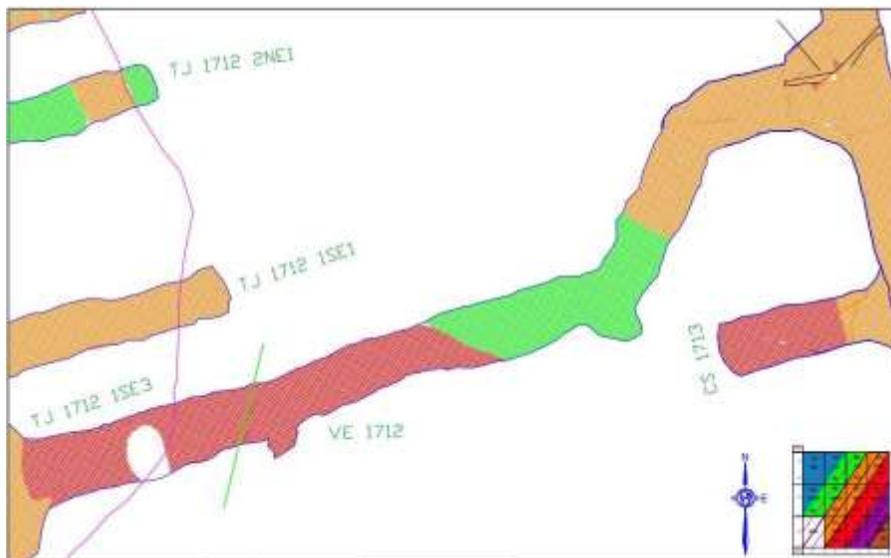


Figura 39. Ventana de acceso al nivel 1712, escala 1: 200. Los cambios de color corresponden a los indicados para la zonificación geomecánica. La línea verde marca el contacto entre el Basalto y el Chert negro. Modificado del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble.



- **Basalto Tipo 1:** Este macizo es de tipo IF/R, por lo tanto, su sostenimiento puede ser de dos tipos, C (color naranja) y D (color rojo); para definir cuál de los dos diseños de sostenimiento se debe implementar, es preciso tener en cuenta su valor de RMR el cual es de 39.4 lo cual indica según la tabla GSI que el sostenimiento a instalar en los avances sobre este macizo son del tipo D: SH2'' + M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1''. (Figura 40).
- **Basalto Tipo 2:** Este macizo es del tipo MF/R con un RMR de 47.4, según la metodología implementada el sostenimiento recomendado es de tipo C: SH2'' + M (Gdt) + PH @ 1.5 x 1.5. (Figura 40).
- **Chert negro Tipo 2:** Este macizo es del tipo IF/R, con un RMR de 37.3, según la metodología implementada el sostenimiento recomendado es del tipo D: SH2'' + M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1''. (Figura 39).
- **Sulfuro Tipo 1:** Este macizo es del tipo IF/R, con un RMR de 36.5, según la metodología implementada el sostenimiento recomendado es del tipo D: SH2'' + M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1''. (Figura 40).
- **Dique Tipo 2:** Este macizo es del tipo MF/R, con un RMR de 52.2, según la metodología implementada el sostenimiento recomendado es del tipo B: M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1'' (Figura 40).

MINA EL ROBLE SOSTENIMIENTO SEGUN G.S.I. (Modificado) LABORES MINERAS PERMANENTES (De 4.0 m a 6.0 m. Abertura)	
A SH2* + PH8 @ 1.5 m X 1.5 m (Gdt) Por evaluación	CONDICIONES BUENA (muy resistente, fresca). Superficies de discontinuidades muy rugosas e inalteradas. Fracturas cerradas. Se rompe con varios golpes de picota (más de 3 golpes) (Rc 100 a 250 MPa) REGULAR (resistente, levemente alterado). Discontinuidades rugosas, moderadamente abiertas (entre 10 a 50 mm), relleno duro. Levemente alterado con picota. Se rompe con 1 a 2 golpes de picota (Rc 50 a 100 MPa) POBRE (Moder. alter). Discontinuidades lisas o con escamas, moderadamente abiertas (entre 10 a 50 mm). Roca con Alteraciones Avanzadas moderadas. Relleno delimitado. Se incide superficialmente con golpes de picota (1 a 5 mm) y a un máximo de 1 (GP) (Rc 25 a 50 MPa). MUY POBRE (blanda, muy alterada). Discontinuidades pulidas o con escamas muy abiertas (mayor a 50 mm). Relleno suave y arcilloso. Muy alterado. Se incide más de 5 mm (Rc 5 a 25 MPa).
B M (Gdt) + PH8 @ 1.5 x 1.5 (Gdt) + SH1* (Sobre malla) Sostenimiento solo para ejecutar con Jumbo empecedor	
C SH2* + M (Gdt) + PH8 @ 1.5 X 1.5 + SH1* (Por evaluación) + SB/PRESOP @ 1.2 X 1.2 X 4m (Por evaluación) Presoporte para generar avances.	
D SH2* + M (Gdt) + PH8 @ 1.2 X 1.2 + SH1* + SB/ENF @ 1.0 X 1.0 X 4m Presoporte para generar avances.	
E SH2* + M (Gdt) + PH8 @ 1.2 X 1.2 + SH2* + SB/ENF @ 1.0 X 1.0 X 4m Presoporte para generar avances.	
F Ombra THN 295W20 @ 1.0 X 1.0 + Encastado maderaplanchas acortadas + SH2* (Reforzado) SB/PRESOP @ 1.2 X 1.2 X 4m. Presoporte para generar avances.	
Nota: Guía de Sostenimiento recomendado, siempre bajo supervisión y valoración por parte del área de Geomecánica.	
ESTRUCTURA	RMR
FRACTURADO Muy bien trabada, no disturbada, bloques cubicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (ROD 50 - 75%) 6 a 11 fracturas por metro	75 70 65 60 55 50 RMR
MUY FRACTURADO Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por 4 o mas sistemas de discontinuid. (ROD 25 - 50%) (12 a 20 fracturas por metro)	45 40 35 30 25 20 15
INTENSAMENTE FRACTURADO Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques irregulares o angulosos (ROD 0 - 25%) (más de 20 fracturas por metro)	(A) (B) (C) (D) (F/B) (F/R) (F/P) (F/A) (B) (C) (D) (B') (C') (D') (M/F/B) (M/P) (M/A) (M/B) (B) (C) (D) (E) (F) (C) (D) (E) (F) (C) (D) (E) (F) (C) (D) (E) (F)

Figura 40. Tabla GSI para labores permanentes. Las flechas y el área delimitada en color azul indican el tipo de macizo; las líneas continuas definen a partir del RMR el tipo de sostenimiento. Los colores que corresponden a cada roca son: gris – basalto, amarillo – sulfuro, café – chert negro. (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble 2017).

8.6.2. Labores temporales

Las galerías y los tajos son las denominadas labores temporales debido a que su tiempo de apertura es corto, dos semanas en el caso de los tajos y de 1-6 meses en el caso de las galerías;



por esta razón los tajos presentan un sostenimiento de menor capacidad que el utilizado sobre las galerías.

8.6.2.1. Galerías 1712 (GA 1712 S y GA 1712 N)

Los avances sobre las galerías se desarrollaron principalmente sobre los tres tipos de sulfuro determinados y, hacia la parte más norte en una zona donde los avances se presentaron en Dique Tipo 1 de espesor aproximado de 10 metros (tres a cuatro avances). La Ga 1712 S se desarrolló sobre Sulfuro Tipo 1 que es el sulfuro con menor calidad, mientras la Ga 1712 N se desarrolló en Sulfuro Tipo 2 y Tipo 3 de mejor calidad (Anexo 2). El sostenimiento ejecutado sobre estos macizos se describe a continuación:

- **Sulfuro Tipo 1:** La metodología implementada para la determinación del tipo de sostenimiento a instalar sobre las labores temporales, es la misma que la utilizada para labores permanentes, sin embargo, los estándares de sostenimiento son diferentes. El Sulfuro Tipo 1 es un macizo clasificado como IF/R según el criterio GSI y presenta un puntaje RMR de 36.5, por lo tanto, el sostenimiento necesario para su estabilidad, según el criterio GSI y basados en el estándar de sostenimiento de la mina, su sostenimiento puede ser de dos tipos, C (color naranja) y D (Color rojo), de los cuales se selecciona el sistema de sostenimiento D debido a su puntaje RMR (Tipo D: SH2" + M(Gdt) + PH8" @1.2 X 1.2) (Figura 41).
- **Sulfuro Tipo 2:** Macizo de tipo MF/R, con un RMR de 45.5, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo C: SH2" + M(Bov) + PH8" @1.5 X 1.5 (Figura 41).
- **Sulfuro Tipo 3:** Macizo de tipo MF/R, con un RMR de 52.3, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo Tipo B: SH2" + PH8" @1.5 X 1.5 (Figura 41).

- **Dique Tipo 1:** Macizo de tipo IF/R, con un RMR de 41.2, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo Tipo C: SH2" + M(Gdt) + PH8" @1.5 X 1.5 (Figura 41).

De acuerdo con la metodología implementada para determinar el tipo de sostenimiento para las labores temporales, se tienen las siguientes recomendaciones para la GA 1712 N y GA 1712 S (Tabla 25).

Tabla 25. Recomendaciones de sostenimiento para avances sobre las galerías en el nivel 1712 (Fuente propia).

Tipo de roca	GSI	RMR	Sostenimiento recomendado
Sulfuro tipo 1	IF/R	36.5	Tipo D: <u>SH2" + M(Gdt) + PH8" @1.2 X 1.2.</u>
Sulfuro tipo 2	MF/R	45.5	Tipo C: <u>SH2" + M(Bov) + PH8" @1.5 X 1.5</u>
Sulfuro tipo 3	MF/R	52.3	Tipo B: <u>SH2" + PH8" @1.5 X 1.5</u>
Dique tipo 1	IF/R	41.2	Tipo C: <u>SH2" + M(Gdt) + PH8" @1.5 X 1.5</u>

Es de notarse que, aunque el Sulfuro Tipo 2 y el Dique Tipo 1 presentan el mismo tipo de sostenimiento (tipo C), se determina apoyándose en el estándar de sostenimiento y debido a su calidad más baja llevar la malla a la gradiente en el dique, y no a bóveda, aumentando así el factor de seguridad, debido a que su valor de RMR se encuentra al límite de una condición más inestable para la cual se utilizaría un tipo de sostenimiento tipo D (Figura 40); esto se realiza con el fin de asegurar que el sostenimiento cumpla su labor de estabilización en este macizo con las características mencionadas y evitar la incertidumbre respecto a su comportamiento futuro.

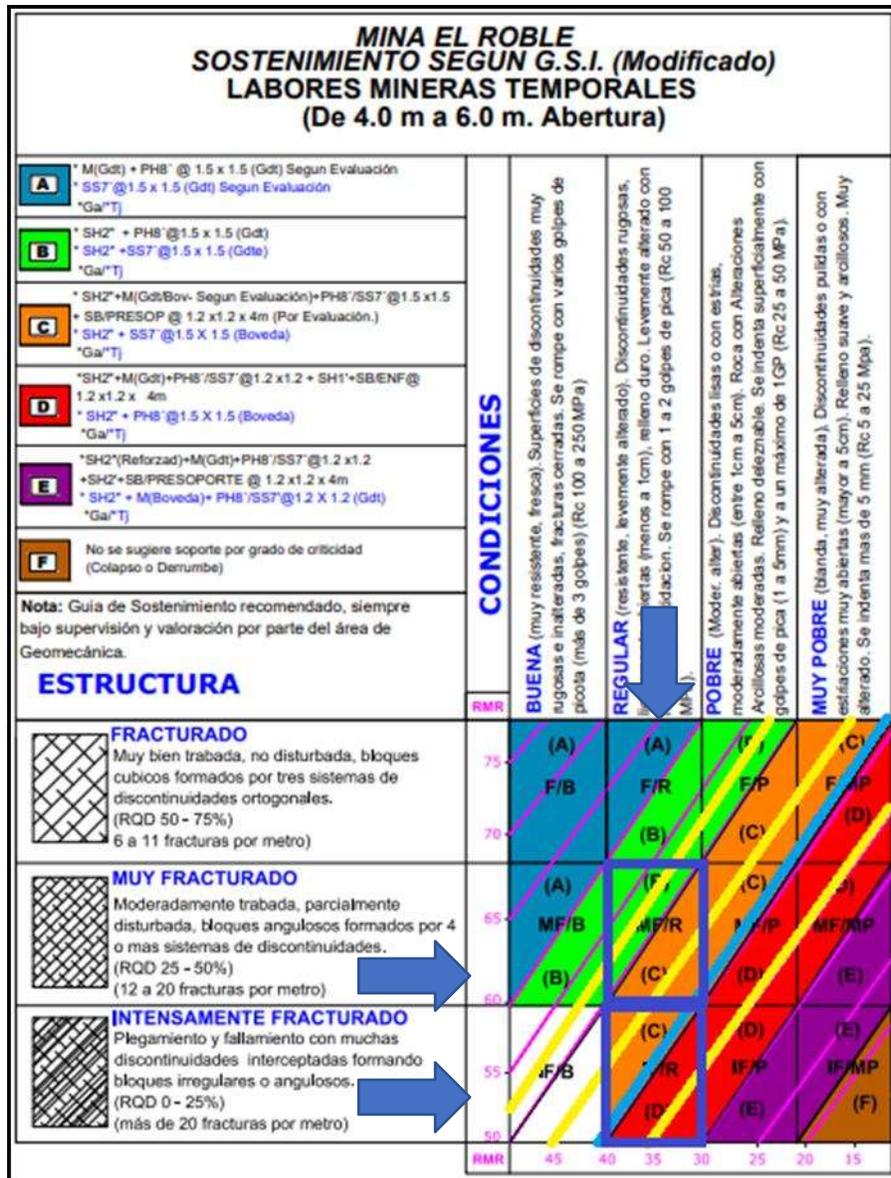


Figura 41. Tabla GSI para labores temporales, aplicada a las galerías. Las flechas y las áreas delimitadas en color azul indican el tipo de macizo; las líneas continuas definen a partir del RMR el tipo de sostenimiento. Los colores que corresponden a cada roca son: amarillo – sulfuro y azul – dique (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble, 2017).

8.6.2.2. Tajos

Sobre los tajos los avances fueron más diversos, estos avances se dieron en todos los tipos de macizo determinados, a excepción de los dos tipos de basalto (Anexo 2), así como se describe a continuación:



- **Chert Tipo 1:** Este macizo es del tipo MF/R, con un RMR de 42.4, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo C: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov) (Figura 42).
- **Chert Tipo 2:** Este macizo es del tipo IF/R, con un RMR de 37.3, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo D: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov) (Figura 42).
- **Sulfuro Tipo 1:** Este macizo es del tipo IF/R, con un RMR de 37.3, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo D: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov) (Figura 42).
- **Sulfuro Tipo 2:** Este macizo es del tipo MF/R, con un RMR de 45.5, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo C: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov) (Figura 42).
- **Sulfuro Tipo 3:** Este macizo es del tipo MF/R, con un RMR de 52.3, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo B: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov) (Figura 42).
- **Dique Tipo 1:** Este macizo es del tipo IF/R, con un RMR de 41.2, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo C: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov) (Figura 42).
- **Dique Tipo 2:** Este Macizo es del tipo MF/R, con un RMR de 52.2, según la metodología el sostenimiento recomendado es del tipo B: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov) (Figura 42).

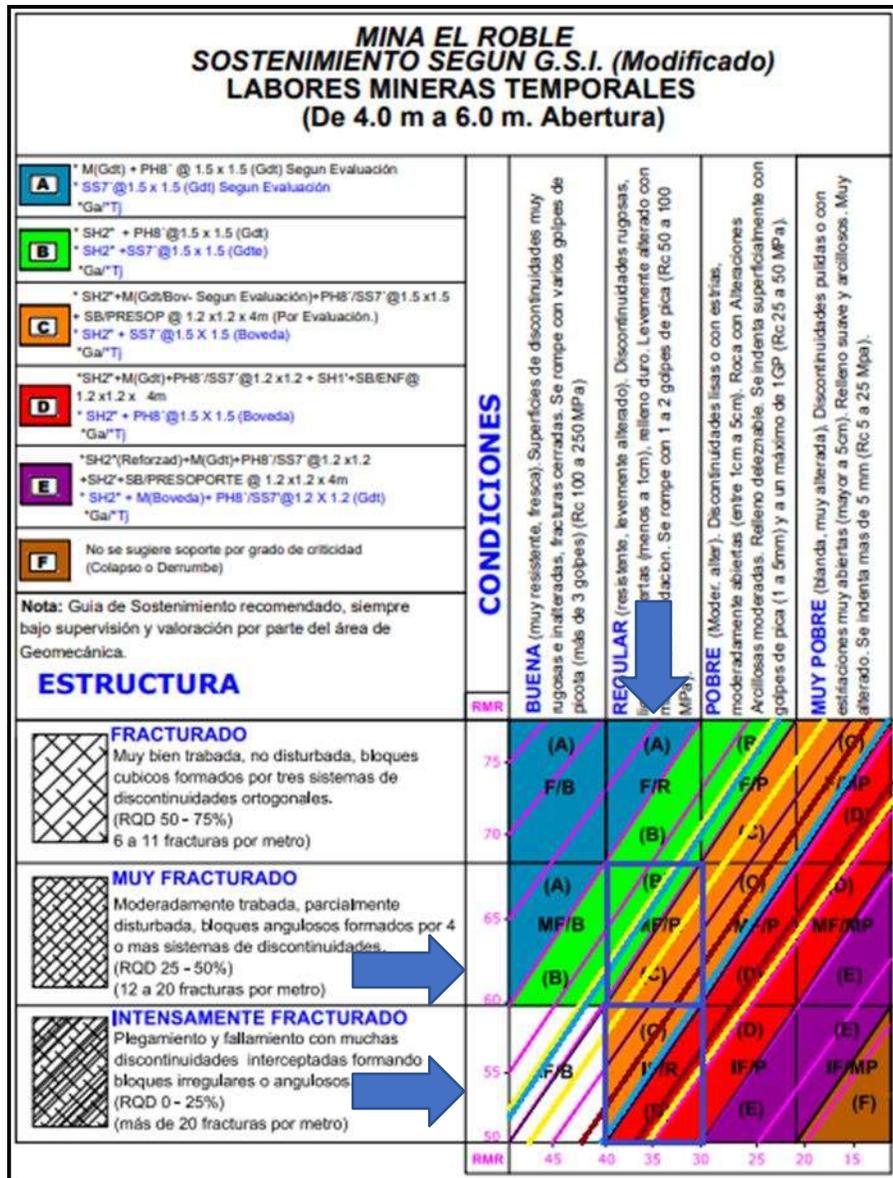


Figura 42. Tabla GSI para labores temporales, aplicada a los tajos. Las flechas y las áreas delimitadas en color azul indican el tipo de macizo; las líneas continuas definen a partir del RMR el tipo de sostenimiento. Los colores que corresponden a cada roca son: amarillo – sulfuro, café – chert negro y azul claro - dique. (Departamento de Geomecánica de la mina El Roble, 2017).

De acuerdo con la metodología implementada para determinar el tipo de sostenimiento para las labores temporales, se tienen las siguientes recomendaciones para los tajos primarios del nivel 1712 (Tabla 26).

Tabla 26. Sostenimiento recomendado para los avances desarrollados sobre los tajos en el nivel 1712 (Fuente propia).

Tipo de roca	RMR	GSI	Sostenimiento recomendado
Chert tipo 1	42.4	MF/R	Tipo C: <u>SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)</u>
Chert tipo 2	37.3	IF/R	Tipo D: <u>SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)</u>
Sulfuro tipo 1	36.5	IF/R	<u>Tipo D: SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)</u>
Sulfuro tipo 2	45.5	MF/R	Tipo C: <u>SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)</u>
Sulfuro tipo 3	52.3	MF/R	Tipo B: <u>SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)</u>
Dique tipo 1	41.2	IF/R	Tipo C: <u>SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)</u>
Dique tipo 2	52.2	MF/R	Tipo B: <u>SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)</u>

Es de tenerse en cuenta que los avances realizado sobre las labores de explotación, es decir, sobre los tajos y cuyos macizos expuestos presenten litologías con rangos de RMR que se encuentren entre 31-40, se sostienen a partir de un lanzado de *Shotcrete* reforzado (incorpora una mayor cantidad de fibra sintética, elemento que le otorga mayor resistencia y maleabilidad ante la deformación) y con *Split set* instalados en sistemático a diferencia de aquellas labores de explotación que avancen sobre macizos con puntajes globales de RMR que se encuentren por encima de 40 puntos se sostienen con un lanzado de concreto normal, es decir, con la cantidad de fibra estándar establecida en la mina, e igualmente con *Split set* instalado en sistemático.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1. Estabilidad por orientación de las discontinuidades

Para evaluar la estabilidad por orientación de las discontinuidades, se debe tener presente que con el fin de obtener mejores condiciones de estabilidad, la dirección de avance de las excavaciones, debe darse de forma perpendicular al rumbo de la familia dominante de discontinuidades, o si es el caso, en macizos con formación importante de cuñas, también en lo posible el eje principal de la excavación debe ir de forma transversal al rumbo de la cuña (Figura 43) (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004).

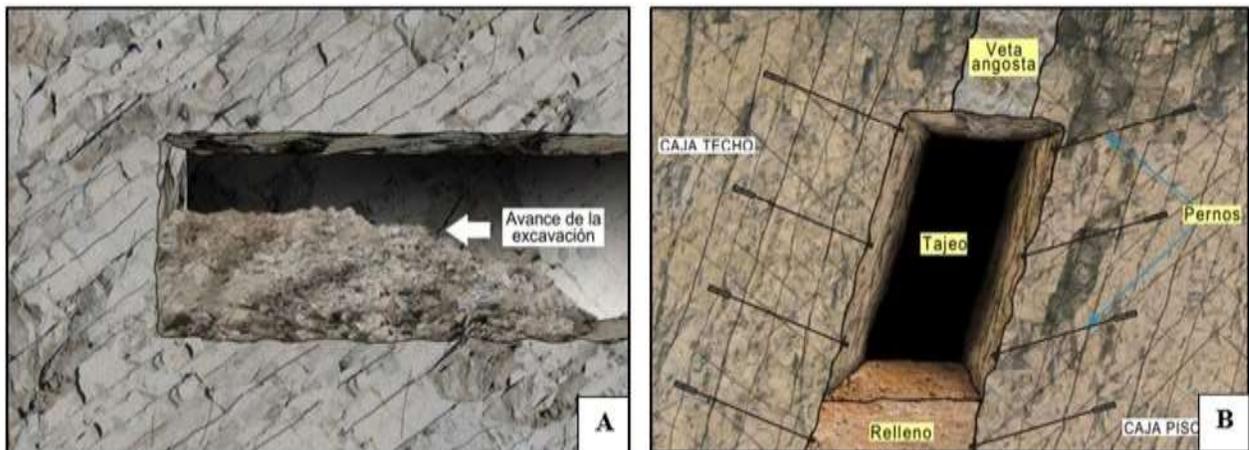


Figura 43. Estabilidad por orientación de las juntas. A) Condición favorable; B) Condición desfavorable (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía, 2004).

El nivel 1712 de la mina el roble estructuralmente se encuentra enmarcado por la presencia de discontinuidades con direcciones tanto W-E y N-S, sin embargo, son dominantes en el nivel las estructuras con orientación W-E que representan el 50% de los datos recolectados.

Las familias de discontinuidades FM1 y FM2 representan las dos familias de mayor influencia en el nivel. Corresponden a estructuras con orientación NEE-SWW y W-E respectivamente y conforman el 50% de los datos tomados en campo; sin embargo, la concentración de FM1 (5-7%) es la mayor entre todas las familias determinadas en este informe; razón por la que se considera



como la familia principal de discontinuidades. Las características de estas dos familias afectan la estabilidad de aquellos frentes mineros cuyos rumbos siguen tendencias E-W o cercanas, es decir, principalmente las labores de explotación (Tajos) y labores de preparación como la ventana de acceso al nivel, por el contrario, se ven favorecidos aquellos frentes mineros que avancen en direcciones N-S como las galerías.

Las familias de discontinuidades secundarias FM3 y FM4 presentan orientaciones predominantemente N-S y NNW-SSE respectivamente, estas tendencias corresponden a un 25% de los datos estructurales tomados en el macizo rocoso del nivel 1712. Estas familias de discontinuidades afectan principalmente aquellos frentes que se desarrollan en dirección N-S o en direcciones aproximadas a esta como las galerías de acceso a las labores de explotación, por el contrario, favorecen aquellos frentes que avancen de forma transversal a estas familias, es decir, en direcciones E-W o cercanas como los tajos y la ventana de acceso al nivel.

La familia de discontinuidades FM5 corresponde a un 25% de los datos estructurales medidos en campo, presenta una dirección preferencial NE-SW y representa una condición intermedia, es decir, se considera que la presencia de esta familia afectará de igual forma todas las excavaciones en el nivel 1712, pues, se presenta de manera transversal, no perpendicular en todos los avances, por lo que no genera condiciones totalmente favorables o desfavorables en los avances, sin embargo es importante su presencia en la formación de cuñas al conjugarse con otras familias de discontinuidades.

La Tabla 27 muestra en resumen las condiciones de estabilidad que representan para los avances en las excavaciones en el nivel 1712 de la mina El Roble las cinco familias de discontinuidades presentes.

Tabla 27. Condición de estabilidad para las excavaciones del nivel 1712 de la mina El Roble según la orientación de las discontinuidades. DF representa una condición desfavorable y F una condición favorable.

Condición de estabilidad por orientación de las discontinuidades			
	Tipo de Labor		
Familia	Ventana	Galería	Tajo
FM1	DF	F	DF
FM2	DF	F	DF
FM3	F	DF	F
FM4	F	DF	F
FM5	*	*	*

9.1.1. Análisis de cuñas

El presente es solo un análisis inicial basado en la estereografía obtenida a partir del *software Dips*, por lo que servirá solo como un punto de partida para un análisis de falla y dinámica de bloques y cuñas en el macizo rocoso de la Mina el Roble.

Con base en los estereogramas realizados (Figura 35 C), un aspecto importante a tener en cuenta, es la línea de intersección entre planos, lo que indica la formación de un número importante de cuñas, formadas entre las familias principales de discontinuidades, esta línea de intersección es representada estereográficamente por un punto y queda definida por su ángulo de inclinación y su rumbo.

Las cuñas que representan condiciones desfavorables de estabilidad al techo de los túneles del nivel 1712 son aquellas cuya orientación se presenta de forma paralela a las excavaciones. Las cuñas formadas entre FM5 y FM1; FM5 y FM2; FM5 y FM4; FM4 y FM1; FM2 y FM1 (Figura 24) presentan una orientación preferencial NEE-SWW por lo que su estabilidad disminuirá principalmente en los tajos de extracción y en la ventana de acceso, debido a que estos avanzan

en la misma dirección, es decir, su avance es paralelo a la línea de intersección entre los planos de discontinuidades lo que representa una condición desfavorable para la estabilidad de estas labores mineras, por el contrario, las cuñas generadas entre la familia de discontinuidades FM5 y FM6; FM4 y FM3; FM3 y FM2 afectarán principalmente las galerías de acceso, ya que presentan una dirección preferencial NNW-SSE dirección que es paralela al avance de las galerías. Las cuñas formadas entre los planos de las familias FM3 y FM1; FM4 y FM2 presentan una orientación NE-SW orientación que no representa condiciones máximas de desfavorabilidad para ninguna de las labores debido a que las excavaciones se dan de forma transversal a esta (Tabla 28).

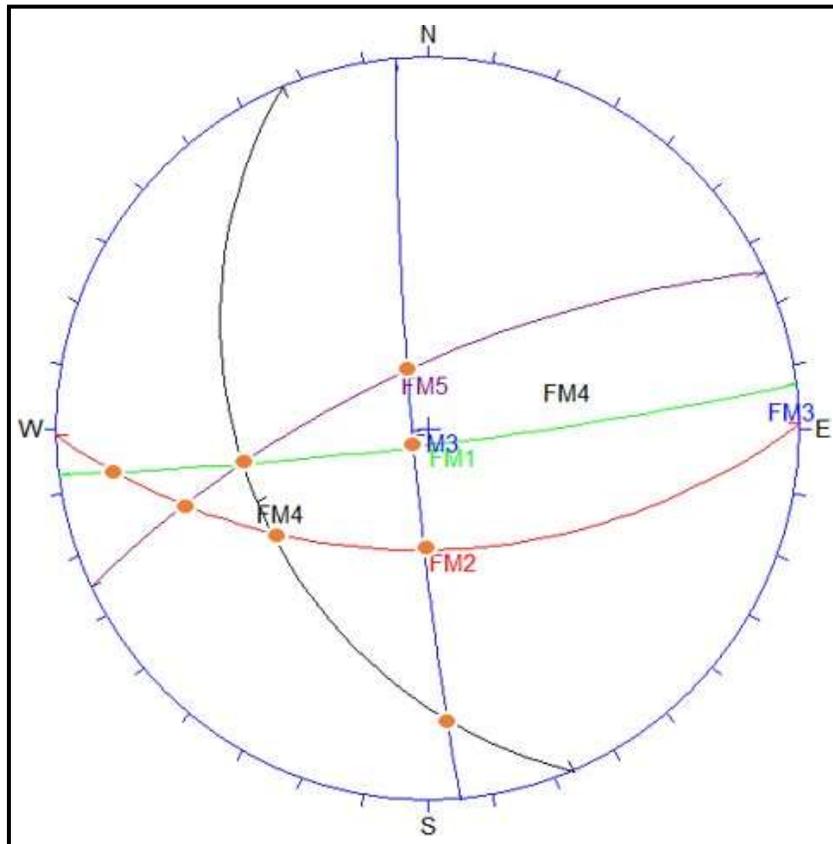


Figura 44. Formación de cuñas entre las cinco familias de discontinuidades, la línea de intersección entre planos es representada estereográficamente por un punto que se encuentra en color naranja.

Tabla 28. Definición por orientación y ángulo de inmersión de la línea de intersección entre los planos de discontinuidades (Fuente propia).

Línea de intersección entre planos		
Planos	Orientación	Inmersión
FM5 y FM1	NEE-SWW	33°
FM5 y FM2	NEE.SWW	26°
FM5 y FM3	NNW-SSE	70°
FM5 y FM4	NEE-SWW	33°
FM4 y FM1	NEE-SWW	33°
FM4 y FM2	NE-SW	36°
FM4 y FM3	NNW-SSE	11°
FM3 y FM1	NE-SW	83°
FM3 y FM2	NNW-SSE	64°
FM2 y FM1	NEE-SWW	76°

9.2 Clasificación RMR y GSI de los macizos rocosos en el nivel 1712.

Según la clasificación RMR obtenida para el macizo rocoso presente en el nivel, este se cataloga como un macizo de regular a mala calidad (Tabla 29); muy fracturado a intensamente fracturado de condiciones regulares, según la clasificación GSI (Tabla 30). Según lo planteado por Bieniawski (1989) (Tabla 31) un macizo con las características geomecánicas calculadas, presenta tiempos de autoaporte de horas en aquellas labores críticas con valores de RMR entre 20 – 40 y macizos con puntajes entre 40 y 60 RMR, representan masas rocosas con tiempos de autoaporte que van desde una semana a tres meses. Para el caso particular evaluado en este informe, se encontraron valores mínimos de RMR de 36 puntos y máximos de 57, es decir, el tiempo de autoaporte para las rocas del nivel 1712 va de algunas horas en las labores con RMR más bajos y entre uno y dos meses en los sectores con mejor calidad; estos tiempos de autoaporte no garantizan la seguridad del personal operario, pues, los tiempos de extracción de un nivel en cualquiera de sus etapas suele durar entre 3 y 6 meses, a veces más tiempo; por esta

razón, se hace indispensable la implementación de un sistema de sostenimiento que garantice la seguridad en los tiempos de minado.

Tabla 29. Clasificación geomecánica de las rocas según el criterio RMR (Fuente propia).

Calificación según RMR			
Litología	Puntaje	Clase	Tipo
basalto tipo 1	39.4	IVA	MALA A
basalto tipo 2	47.4	IIB	REGULAR B
chert tipo 1	42.4	IVA	MALA A
chert tipo 2	37.3	IVA	MALA A
sulfuro tipo 1	36.5	IVA	MALA A
sulfuro tipo 2	45.5	IIIB	REGULAR B
sulfuro tipo 3	52.3	IIIA	REGULAR A
dique tipo 1	41.2	IVA	MALA A
dique tipo 2	52.2	IIIB	REGULAR B

Tabla 30. Clasificación geomecánica de las rocas según el criterio GSI (Fuente propia).

Clasificación GSI			
Litología	Estructura	Condición	Clasificación
basalto tipo 1	Muy fracturado (IF)	Regular (R)	IF/R - Tipo D
basalto tipo 2	Intensamente fracturado (MF)	Regular (R)	MF/R - Tipo C
chert tipo 1	Muy fracturado (MF)	Regular (R)	MF/R -Tipo C
chert tipo 2	Intensamente fracturado (IF)	Regular (R)	IF/R-Tipo D
sulfuro tipo 1	Intensamente fracturado (IF)	Regular (R)	IF/R-Tipo D
sulfuro tipo 2	Muy Fracturado (MF)	Regular (R)	MF/R -Tipo C
sulfuro tipo 3	Muy Fracturado (MF)	Regular (R)	MF/R -Tipo B
dique tipo 1	Intensamente fracturado (IF)	Regular (R)	IF/R-Tipo C
dique tipo 2	Muy Fracturado (MF)	Regular (R)	MF/R-Tipo B

Tabla 31. Tiempo medio de autosoporte en excavaciones no superiores a 10 metros (Bieniawski, 1989).

RMR	Descripción	Tiempo medio de autosoporte
0-20	MUY POBRE	10 min/0,05 min
21-40	POBRE	5 h/ 15 min
41-60	REGULAR	1 sem. / 3 meses
61-80	BUENO	4 a 6 meses
81-100	MUY BUENO	> 5 MESES

9.3. Recomendaciones de sostenimiento para las labores del nivel 1712

Según el estándar de sostenimiento diseñado por el área de la empresa Minera El Roble y a partir de los resultados de las clasificaciones geomecánicas RMR y GSI fue determinado el sostenimiento recomendado para los avances sobre las labores en el nivel 1712; de este modo los elementos de sostenimiento están contenidos en la Tabla 32.

- VE 1712: Los avances sobre la ventana de acceso al nivel se dieron sobre cuatro tipos de roca con características geomecánicas diferentes, dos de las cuales representan condiciones críticas de estabilidad, sus puntajes de RMR se encuentran por debajo de 40. Por tratarse de una labor que tendrá un tiempo de apertura máximo, pues estará abierta durante todo el tiempo de extracción del nivel, es decir, aproximadamente 6 meses en la extracción primaria y otros 6 meses en la extracción de tajos secundarios; el *shotcrete* como sostenimiento base garantiza la estabilidad inmediata de estos



sectores intensamente fracturados y de baja calidad, posteriormente la malla llevada a gradiente da un soporte secundario al *shotcrete* en caso de falla, el perno helicoidal en sistemático a 1.2 m garantiza la estabilidad de bloques y cuñas hasta por 21 toneladas y finalmente un lanzamiento final de *shotcrete* aumenta aún más el factor de seguridad de la tunelería garantizando un tiempo de sostenimiento suficiente para que transcurra el periodo de extracción sin contratiempos. Los otros dos macizos en los que se presentaron los avances tienen valores de RMR superiores a los 40 puntos, por lo que su sostenimiento puede ser de menor capacidad se implementa el lanzamiento de *shotcrete* la instalación de malla a gradiente y se amplía el sistemático de los pernos helicoidales a 1.5 m.

- GA 1712 N Y GA 1712 S: se debe tener presente que el tiempo de sostenimiento necesario para las galerías es de aproximadamente 6 meses, los avances en los tajos primarios se dieron en macizos con puntajes de RMR superiores a los 40 puntos a excepción de Sulfuro Tipo 1. El sostenimiento base para la galería es el *shotcrete* y la malla (la cual irá a bóveda o a gradiente conforme disminuya o aumente la calidad del macizo), todas las galerías se sostienen con pernos helicoidales cuyo espaciado sistemático aumenta de 1.2 a 1.5 metros conforme aumente la calidad del macizo rocoso.
- Tajos: Los avances sobre los tajos fueron los más variados, estos avances se desarrollaron sobre todos los tipos de macizo a excepción de los basaltos, sin embargo al tratarse de labores cuyo tiempo de apertura no debe ser superior a 4 semanas, sus sostenimientos no son muy variados y se fundamentan en un lanzamiento de *shotcrete* que podrá ser reforzado o normal (reforzado en aquellos avances en macizos con RMR

menores a 41 puntos) y se completa el sistema de sostenimiento con la instalación de *Split set* espaciados a 1.5 metros, estos presentan una capacidad de 9 toneladas.

Todos los sistemas de sostenimiento determinados en este informe y recomendados en campo, concuerdan de manera adecuada con el sistema de sostenimiento establecido por Minera El Roble S.A, estas recomendaciones funcionaron de manera adecuada, de tal manera que la extracción de los tajos primarios transcurrió satisfactoriamente con cero accidentes por caída de roca y sin aumento o desfases en los presupuestos para gastos en elementos de sostenimiento por nivel.

Tabla 32. Recomendaciones de sostenimiento implementadas para la primera etapa de extracción del nivel 1712 de la mina El Roble (Fuente propia).

Labores	Litología	Sostenimiento recomendado
VE 1712	basalto tipo 1	SH2" + M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1"
	basalto tipo 2	SH2" + M (Gdt) + PH @ 1.5 x 1.5
	chert tipo 2	SH2" + M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1"
	Dique tipo 2	M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1"
	sulfuro tipo 1	SH2" + M (Gdt) + PH @1.2 X 1.2 + SH1"
GA 1712 N	sulfuro tipo 1	SH2" + M(Gdt) + PH8" @1.2 X 1.2.
	sulfuro tipo 2	SH2" + M(Bov) + PH8" @1.5 X 1.5
GA 1712 S	sulfuro tipo 2	SH2" + M(Bov) + PH8" @1.5 X 1.5
	sulfuro tipo 3	SH2" + PH8" @1.5 X 1.5
	dique tipo 1	SH2" + M(Gdt) + PH8" @1.5 X 1.5
Tajos	chert tipo 1	SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)
	chert tipo 2	SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)
	sulfuro tipo 1	SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)
	sulfuro tipo 2	SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)
	sulfuro tipo 3	SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)
	dique tipo 1	SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)
	dique tipo 2	SH2" + SS7"@1.5 X 1.5 (Bov)



9.4. Zonificación geomecánica del nivel 1712

El mapa presente en el anexo 2 corresponde a la zonificación geomecánica producto final de la caracterización geomecánica realizada, en él se pueden apreciar delimitadas las zonas que presentan un comportamiento geomecánico similar diferenciadas por colores (Tabla 24) de otras zonas con comportamientos geomecánicos diferentes.

Para el nivel 1712 de la Mina el Roble se dieron durante la primera etapa de extracción de los tajos primarios un total de 475.6 metros de avance lineal, distribuidos así:

- Ventana 1712: 81.9m que corresponden a un 17% del avance total.
- Galería 1712 N y Galería 1712 s: 104 m – 22% del avance total.
- Tajos: En total se completó la extracción de 18 tajos que corresponden a 289.7m de avance, es decir, el 61% del avance total en el nivel.

En la zonificación realizada en el nivel, se diferencian tres tipos de macizo, con puntaje RMR entre 30 a 40 (color rojo); RMR 40-50 (color naranja) y macizos con valores de RMR entre 50 y 60 (color verde). La ventana de acceso al nivel se desarrolló sobre los tres tipos de macizo, 19% del avance se encuentra en color naranja, un 24% en color verde y el 57% restante en color rojo, más de la mitad del avance sobre la ventana de acceso en el nivel avanzó en roca de mala calidad, por lo que para garantizar su estabilidad se debió instalar un sostenimiento de mayor capacidad, lo que se traduce en un aumento principalmente en los gastos del *shotcrete* y pernos helicoidales, pues, en labores permanentes las masas rocosas de baja calidad se refuerzan con estos dos elementos, aumentando el espesor de la capa de concreto y disminuyendo el espaciamiento entre pernos. El 10% de las galerías se presenta en color rojo, el 48% en color naranja y un 42% en color verde; lo que indica que la mayoría de los avances en las galerías se dio en las rocas de mejor calidad del macizo rocoso del cuerpo Zeus, lo que representa una disminución en los



costos de sostenimiento ya que se reduce la cantidad de malla y pernos helicoidales utilizados para reforzar aquellos macizos de mala calidad que se presentan sobre las galerías. El 20% de los avances sobre los tajos se encuentra en color rojo, un 64% en color naranja y el 16% en color verde; el 80% de los avances sobre los tajos se da en rocas de calidad regular con RMR superiores a 40 para los cuales su sostenimiento requiere de un *shotcrete* normal, lo que representa ahorro en los costos de fibra sintética que se utiliza en lanzados de *shotcrete* reforzado en labores de calidad mala.

Para realizar un análisis general de la zonificación realizada se debe tener presente que el cuerpo Zeus presenta rocas de mala y de regular calidad, siendo las rocas de más mala calidad y que requiere de un sostenimiento de mayor capacidad, aquellas con puntajes RMR entre 20 y 40; el 24% de la calidad de las rocas en el nivel 1712 se encuentra representado por el color rojo, el 53% se encuentra en color naranja y el 23% en color verde, esto indica que en términos generales para el cuerpo Zeus, el nivel 1712 se desarrolló sobre las rocas de mejor calidad presentes en el cuerpo, es decir, aquellas comprendidas entre 40 y 60 RMR, lo que favorece los costos de sostenimiento, debido a que solo el 24% de las rocas expuestas en la primera etapa de extracción requirió un sostenimiento reforzado para alcanzar su estabilidad.



10. RECOMENDACIONES

10.1. Recomendaciones generales

- Para que el sostenimiento recomendado arroje los resultados de seguridad esperados, es fundamental que se realicen de manera correcta las labores de desate previas a la instalación del sostenimiento, eliminando todo tipo de cuñas o material sueltos que pueda fallar fácilmente.
- Las labores que avancen sobre macizos de mala calidad (puntajes RMR menores a 40 y que se presenten intensamente fracturados) se les deberá asignar prioridad de sostenimiento, debido a que su tiempo de autoaporte es corto y pueden tender al realce, lo que puede derivar en la pérdida de una labor y en afectaciones de los niveles superiores.
- Se debe prestar especial atención a la presencia de los diques andesíticos, cuya superficie de contacto con las demás rocas representa una condición favorable para que estos se deslicen, ya que suelen presentarse acuñados entre las demás litologías y esto genera un aumento el factor de riesgo por caída de roca.
- Operacionalmente y desde el área de planeamiento, se debe asegurar que los tiempos de extracción del mineral no excedan los tiempos establecidos de apertura, principalmente en las labores temporales como los tajos, ya que los diseños de sostenimiento para este tipo de labores se realizan para dar soporte durante un estimado de no más de 4 semanas. En dado caso que el tiempo de apertura de un tajo se extienda por más de 4 semanas, el sostenimiento deberá ser reforzado.



- El sostenimiento debe ser monitoreado constantemente por el personal de geomecánica, con el fin de llevar un control de calidad y velar por la integridad de los elementos de sostenimiento que pueden verse afectados por la continuidad de las operaciones, la presión continua de los esfuerzos en la zona y los agentes externos que alteran la roca y deterioran el sostenimiento.
- Se debe garantizar un relleno completo con RDC en todas las dimensiones de cada una de las labores explotadas, debido a que las faltas de topeo pueden derivar en un sobredimensionamiento de las labores tras las voladuras y además, los bloques de RDC que presentan falta de topeo tienden a fisurarse más fácilmente sobre todo en los niveles más profundos donde las presiones aumentan, generando un factor de inseguridad elevado en estos elementos.

10.2.Recomendaciones para la extracción de tajos secundarios

Una vez se inicie con la segunda fase de explotación de este nivel en donde se explotarán los llamados tajos secundarios, se deberán tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- En el momento en que inicien nuevamente los avances sobre la VE 1712 y sobre las galerías con el fin extraer los tajos secundarios, las voladuras deberán ser controladas con el fin de proteger el sostenimiento antiguo y no generar retrocesos en la operación con trabajos de recuperación.
- Las superficies de falla en la zona de contacto representan un factor de inseguridad elevado, como ya se ha evidenciado en incidentes históricos dentro de la operación. Con base en lo anterior, se deberá reforzar el sostenimiento sobre el hastial derecho de estos tajos, con la instalación de una malla a gradiente y en caso de que los avances se den en roca de mala calidad realizar un lanzado sobre malla (SH1”).



- Se deberán enmallar a sección todos los radios de giro de los tajos primarios (Rellenos ya con RDC), debido a que el RDC suele presentar fisuras verticales en los niveles más profundos como el nivel 1712, a causa del aumento de las presiones y las faltas de topeo, lo que representa un potencial peligro para el personal de la operación.
- Se deberá asegurar que los hastiales de los tajos que avancen continuos a otros en RDC expongan las superficies del relleno y no queden costras de mineral adheridas a las superficies de este, dado que las costras representan una condición de inseguridad, pues suelen fallar fácilmente por el tipo de contacto entre estos dos elementos.



11. CONCLUSIONES

- La zona de estudio (NV 1712) presenta un control estructural predominante en sentido W – E, representado por cinco familias de discontinuidades; una principal cuyo mayor número de estructuras presenta tendencias NWW – SEE Y SWW – NEE. Igualmente se presentan concentraciones importantes de estructuras secundarias con tendencias N-S. Las tendencias principales son correlacionables y podrían ser consecuencia de la Falla la Mansa que cruza el área de la mina con dirección predominante NW-SE, mientras las tendencias N-S son cercanas a la orientación NNW de la Falla San Lorenzo.
- Se evidencia una formación importante de cuñas en este nivel formadas entre las cinco familias de discontinuidades, así como el predominio de estructuras con buzamientos elevados casi verticales, sobre estructuras con ángulos de buzamiento menores presentes en el nivel, lo que favorece el deslizamiento de bloques que afectaran principalmente frentes mineros cuyos rumbos sigan tendencias E-W O NEE – SWW. Este es solo un análisis inicial y se requiere un análisis más profundo de la dinámica de los bloques y cuñas.
- El nivel 1712 se desarrolla geomecánicamente de manera más amplia y según la clasificación GSI en dos tipos de macizos, de calidad regular y de mala calidad, lo que hace a este nivel crítico y de baja estabilidad, es imperativo entonces el uso de un sistema de sostenimiento debidamente diseñado bajo el estándar de Minera el Roble cómo el propuesto en este trabajo para cada tipo de macizo.
- Geomecánicamente hablando y bajo el criterio de clasificación RMR, el nivel 1712 avanza en 9 tipos de roca, siendo las rocas de más baja calidad el Chert Tipo 2 y el Sulfuro Tipo 1, clasificadas como “mala A” (RMR 37.3 Y 36.5 respectivamente) y según el criterio GSI



como IF/R por lo que su sostenimiento debió ser instalado de manera inmediata, pues estos tipos de macizos tienden fácilmente al realce.

- Las rocas de mejor calidad dentro del nivel 1712 son el Sulfuro Tipo 3 y el Dique Tipo 2 clasificadas como “regular A y Regular B” (RMR 52.3 Y 52.2 respectivamente) y según el criterio GSI como MF/R, lo que indica que las propiedades geomecánicas de estas rocas favorecen los avances y requieren un sostenimiento de menor capacidad, lo que optimiza los tiempos de minado y disminuye los costos de la operación.
- La extracción de los tajos primarios en el nivel 1712 se desarrolló según lo esperado bajo las recomendaciones de sostenimiento implementadas en los avances. Se presentaron cero accidentes por caída de roca, lo que indica que la metodología empleada, la cual es implementada en la mina El Roble funciona de manera adecuada.



12. REFERENCIAS

Álvarez, E. G., y González, H. I. (1978). *Geología y geoquímica del cuadrángulo I-7, Urrao*.

Medellín: INGEOMINAS.

Arboleda, G.; Celada, C., Forero, S., Montealegre, V., Padilla, J.C., Carmona, J., y Medina., E.

(2009). *Cartografía Geológica Y Muestreo Geoquímico En La Parte Norte De La Cordillera*

Occidental, Planchas 165 Y 185 (396 Kilómetros Cuadrados). Bogotá: UTAGS-GE.

Barton, N. R. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel

Support. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support

Betancur, B. A., y Balaguera, C. E. L. (2019). *Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocosos en el nivel veintiuno de la mina La Maruja (distrito minero de Marmato, Caldas) para estimar las condiciones de estabilidad y soporte en la excavación y su correlación con las alteraciones*. Medellín: Universidad EAFIT.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: a Complete Manual*. New

York. Recuperado de:

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pejDUvjwPdMC&oi=fnd&pg=PP13&dq=Engineering+Rock+Mass+Classifications:+a+Complete+Manual&ots=4UmeVBY-Ws&sig=ln6JPS7aR3nzRd66yfsHD8bgS2w#v=onepage&q=Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications%3A%20a%20Complete%20Manual&f=false>

Brito, R. S. C., Mejia, P. H., y Vasconcelos, P. M. (2010). Preliminary Ar-Ar U-Pb La ICPMS dating and the tectonic significance of andesitic porphyry dykes from El Roble Cu-Au



VMS deposit -Eastern Cordillera-Colombia. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/266854488_Preliminary_Ar-Ar_U-Pb_La_ICPMS_dating_and_the_tectonic_significance_of_andesitic_porphyry_dykes_from_El_Roble_Cu-Au_VMS_deposit_-Eastern_Cordillera-Colombia

Calle, B. C., y Salinas, R. E. (1986). *Geología y geoquímica de la plancha 165 Carmen de Atrato*. Medellín: Ingeominas. Recuperado de:

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024266/documento/pdf/0101242661101000.pdf>

Centro de Capacitación de Geomecánica y Geotécnia. (2018). *Mapeo Geomecánico para Tuneles y/o excavaciones subterráneas*. Lima: Curso-Taller Online Internacional. Recuperado de:

https://www.academia.edu/23495011/CURSO-TALLER_ONLINE_INTERNACIONAL_MAPEO_GEOMECANICO_PARA_TUNELES_Y_O_EXCAVACIONES_SUBTERRANEAS_CENTRO_DE_CAPACITACION_DE_GEOMECANICA_Y_GEOTECNIA_CCGG

Cook, J. (2016). La geomecánica. *oilfield review*, 51. Recuperado de: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/la-geomecanica.ashx>

Departamento de Geomecánica de la mina El Roble. (2017). *Presentación: Metodo de Explotación del Cuerpo Zeus*. Carmen de Atrato, Chocó, Colombia: *Atico Mining Corporation*.

Departamento de Planeamiento Minero de la Mina El Roble. (2017). *Presentación : Modelo 3D del Cuerpo Zeus y Esquema de Minado*. Carmen de Atrato, Chocó, Colombia: *Atico Mining Corporation*.



- Echeverri, B., y Salas, J. (2017). *Geología del yacimiento El Roble: un VMS Cu-Au de alta ley, Colombia*. Medellín. Recuperado de: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG17-052.pdf>
- Espinal, J. C. (2020). *Caracterización y Modelo Estructural del Yacimiento de Sulfuros Masivos Volcanogénicos de la Mina el Roble*. Medellín. Recuperado de: <https://unal.edu.co/resultados-de-la-busqueda/?q=Caracterizaci%C3%B3n%20y%20Modelo%20Estructural%20del%20Yacimiento%20de%20Sulfuros%20Masivos%20Volcanog%C3%A9nicos%20de%20la%20Mina%20el%20Roble>
- Esparza, G. R. (2016). *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera*. Secretaria de comunicaciones y transportes . Recuperado de: <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/normativa/manuales/>
- Franklin, J. M., Lydon, J. W., y Sangster, D. F. (1981). *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits* (Vol. 75" Anniversari volume). Society of Economic Geologists. Recuperado de: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/books/book/1820/chapter/107705351/Volcanic-Associated-Massive-Sulfide-Deposits>
- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R., y Galley, A. G. (2005). *Volcanogenic Massive Sulfide Deposits* (Vol. 100" Anniversary Volume). Society of Economic Geologists,. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/284690367_Volcanogenic_massive_sulfide_deposits



- Galley, A. B. (1993). Geological setting and hydrothermal evolution of the Chisel Lake and North Chisel Zn-Pb-Cu-Ag-Au massive sulfide deposits, Snow Lake, Manitoba. *Exploration and Mining Journal*, 2, 271-295. Recuperado de:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Geological-setting-and-hydrothermal-evolution-of-Galley-Bailes/d6ff9697618bf0de7049126007cb96cfefbc2254>
- Guzmán, I. D., y Villarruel, J. T. (2005). *Investigación integral del Andén Pacífico Colombiano* (Vol. 1). Medellín: Ingeominas. Recuperado de:
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010020751/documento/pdf/2105207511101000.pdf>
- Hernandez, C. G. (2019). *Estandarización de los Elementos de Sostenimiento Necesarios Para la Estabilidad de Labores Temporales y Permanentes del Macizo Rocosó en el Cuerpo Zeus de la Mina el Roble* [Tesis de pregrado para optar al título de geólogo, Universidad de Caldas]. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/434465980/Practica-Academica-Claus>
- Hoek, E., y Marinos, P. (2000). *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses*. Recuperado de:
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.474.7992&rep=rep1&type=pdf>
- Kelly, T. (2018). *El Roble Mine Updated Mineral Resource and Initial Mineral Reserve Estimates*. Vancouver: Atico Mining Corporation. Recuperado de:
http://aticomining.com/_resources/technical-reports/Atico-technical-report-2018-final.pdf



- Kelly, T. (2021). *El Roble Mine Updated Mineral Resource and Initial Mineral Reserve Estimates*. Vancouver: Atico Mining Corporation . Recuperado de :
<http://aticomining.com/resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf>
- Marinos, V., Marinos, P., y Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64; 55-65. .
Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-004-0270-5>
- Martinez, A. M. (2019). *Evaluación Geomecánica Para la Construcción de Ruta de Evacuación en la Mina El Roble con Tecnología Alimak*. Manizales: Centro Geotécnico Internacional.
Recuperado de: <https://www.centrogeotecnico.com/blog-geotecnia-geomecanica/tesina-evaluacion-geomecanica-para-construccion-de-ruta-de-evacuacion-en-mina-el-roble-con-tecnologia-alimak-colombia-julio-2019-angelica-maria-martinez-quiceno.html>
- Martinez, A. M. (2021). *Adición de relaves en concretos lanzados y su impacto en la calidad final*. 3.Miner S.A
- Niño, V. A. (2017). Metodologías de caracterización de macizos rocosos. *Academia Accelerating the world's research.*, 1. Recuperado de:
https://www.academia.edu/36777450/Metodologias_de_caracterizaci%C3%B3n_de_macizos_rocosos_-_Viviana_Sanchez
- Ortiz, B. F. (1990). El Roble, un yacimiento de sulfuros masivos volcanogénico. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 121-154. Recuperado de:
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/94882>



Perez, M., García, E., Vega, C., Montoya, J., Noriega, P., Alfonso, J., y Cajicá, L. (2017).

Estudio comparativo entre sistemas de clasificación geomecánica en un depósito tipo

Pórfido. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. Recuperado de:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/67217>

Pratt, W. (2014). *New Targets at the El Roble Massive Sulfide, Choco, Colombia*. Vancouver:

Atico Mining Corporation.

Rodríguez, G. y Arango, M. I. (2012). Formación Barroso: arco volcánico toleítico y diabasas de

San Jose de Urama, un crisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la cordillera

occidental de Colombia. 20. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n33/n33a02.pdf>

Rodríguez, G. G. y Zapata, G. G. (2013). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA

FORMACIÓN BARROSO Y EL COMPLEJO QUEBRADAGRANDE: UN ARCO

VOLCÁNICO TOLEÍTICO-CALCOALCALINO, SEGMENTADO POR EL SISTEMA

DE FALLAS DE ROMERAL EN LOS ANDES DEL NORTE. *Boletín Ciencias de la*

Tierra, 39-58. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n33/n33a03.pdf>

Smith, G., y Pohl, D. (2012). *TECHNICAL REPORT ON THE EL ROBLE PROYECT, Chocó*

Department, Colombia. Atico Mining Corporation. Recuperado de:

http://aticominer.com/_resources/technical-reports/2012-07-

[30_El_Roble_Technical_Report.pdf](#)

Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. (2004). *Manual de geomecánica aplicada a la*

prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea. Lima - Perú.



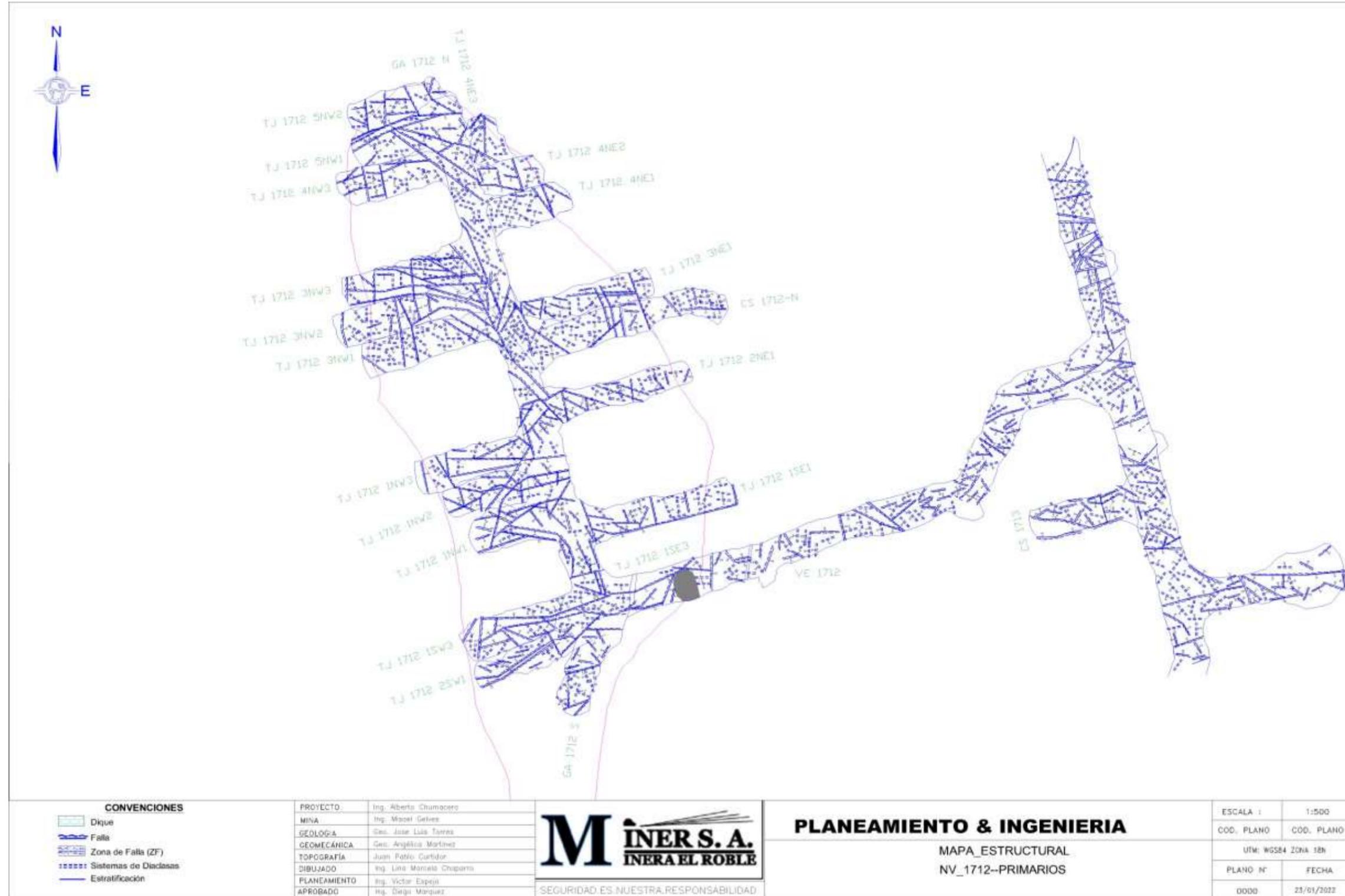
S.R.L.tda., D. I. (2017). *Evaluación geomecánica del minado subterráneo*. Lima-Perú.

Zhang, L. (2016). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sciencedirect.

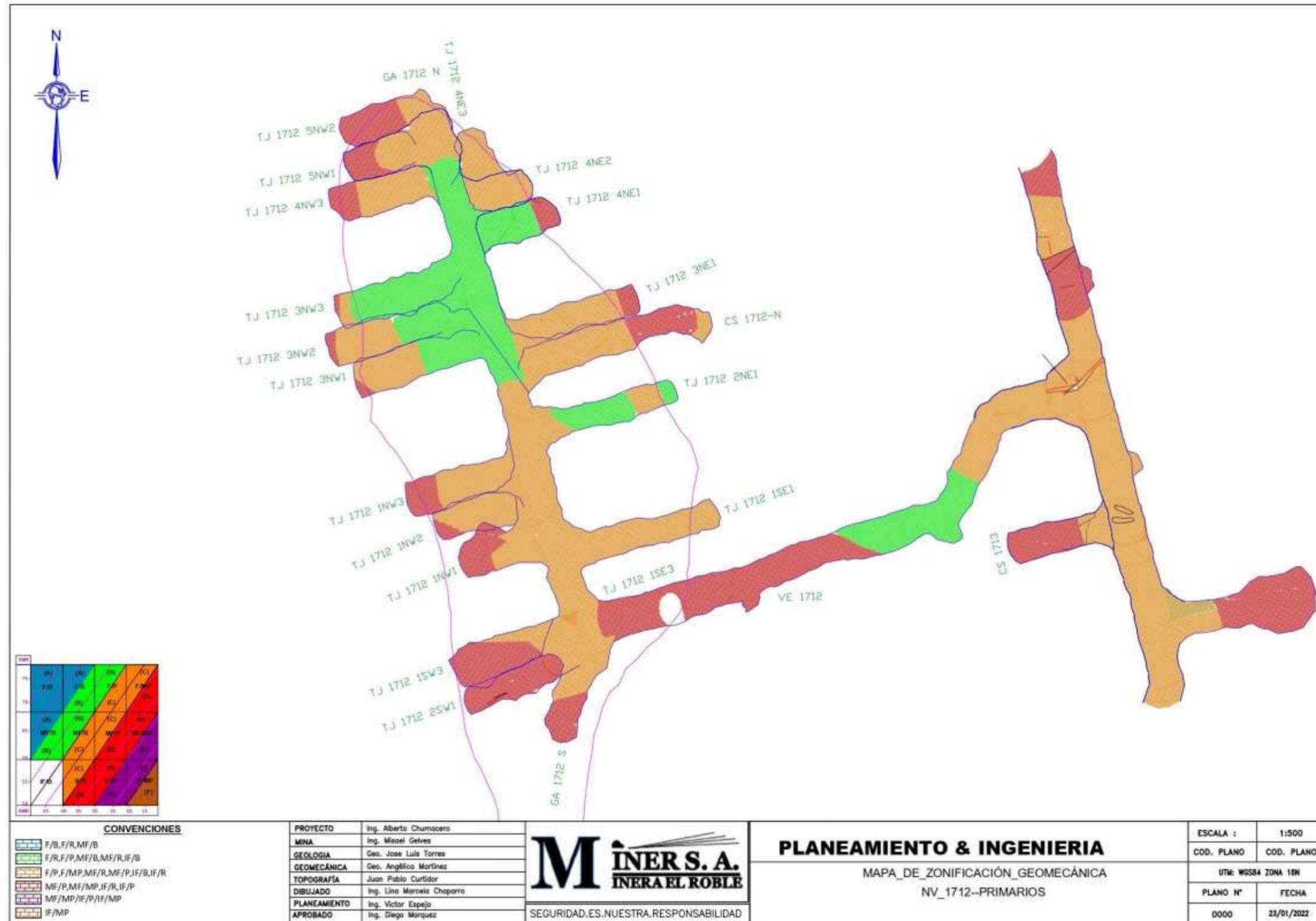
Recuperado de: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-rock-mechanics-and-geotechnical-engineering>

13. ANEXOS

Anexo 1. Mapa estructural del nivel 1712.



Anexo 2. Mapa de zonificación geomecánica del nivel 1712.



**Anexo 3.** Datos estructurales recolectados en el nivel 1712.

VENTANA 1712		
Dato estructural	Dip	dip direction
1	30	150
2	75	320
3	35	200
4	60	165
5	45	140
6	70	330
7	75	150
8	13	125
9	85	165
10	80	330
11	35	180
12	50	300
13	70	340
14	40	240
15	75	290
16	50	300
17	70	340
18	40	240
19	75	290
20	75	135
21	75	335
22	50	20
23	60	310
24	65	140
25	15	345
26	25	170
27	65	260
28	50	215
29	65	335
30	30	120
31	70	330
32	30	320
33	10	300
34	35	145
35	35	140
36	45	340
37	60	330

VENTANA 1712		
Dato estructural	Dip	dip direction
38	55	225
39	65	50
40	60	340
41	45	40
42	45	200
43	50	300
44	55	150
45	50	78
46	60	205
47	75	345
48	75	180
49	15	260
50	65	180
51	75	160
52	60	275
53	70	325
54	72	5
55	45	45
56	52	55
57	83	275
58	60	110
59	65	280
60	52	190
61	80	320
62	75	140
63	60	230
64	62	115
65	25	105
66	45	245
67	85	265
68	55	185
69	80	280
70	25	225
71	40	273
72	45	280
73	50	220
74	82	250



GALERIA 1712 S		
<i>Dato estructural</i>	<i>Dip</i>	<i>dip direction</i>
75	70	189
76	83	352
77	85	340
78	75	180
79	90	170
80	53	360
81	77	60
82	90	170
83	60	120
84	85	300
85	90	170
86	70	230
87	71	165
88	15	260
89	80	130
90	25	280
91	75	135
92	68	75
93	76	108
94	60	320
95	72	25
GALERIA 1712 N		
<i>Dato estructural</i>	<i>Dip</i>	<i>dip direction</i>
96	60	260
97	66	120
98	50	10
99	54	290
100	58	270
101	65	165
102	70	170
103	60	90
104	75	230
105	45	50
106	45	200
107	90	170
108	55	65
109	80	73
110	48	310
111	20	200

GALERIA 1712 N		
<i>Dato estructural</i>	<i>Dip</i>	<i>dip direction</i>
112	76	230
113	80	55
114	90	170
115	44	300
116	90	170
117	35	270
118	90	170
119	90	170
120	35	300
121	23	210
122	75	195
123	50	230
124	70	215
125	60	245
126	33	250
127	30	95
128	25	105
129	45	245
130	85	265
131	55	185
132	80	280
133	25	225
134	40	273
135	45	280
136	50	220
137	82	250
138	90	170
139	43	74
140	50	30
141	50	65
142	55	265
143	35	60
144	90	170
145	90	170
146	90	170
147	90	170
148	50	10
149	54	290
150	58	270



GALERIA 1712 N		
Dato estructural	Dip	dip direction
151	75	180
152	90	170
153	53	360
154	77	60
155	90	170
156	50	65
157	55	265
158	35	60
159	90	170
160	90	170
161	70	160
162	25	160
163	70	340
164	75	15
165	40	160
166	79	170
167	37	15
168	78	15
169	45	195
170	85	105
171	70	300
172	65	220
173	45	170
174	60	360
175	35	335
176	40	240
177	80	245
178	45	90
179	45	230
180	90	170
181	70	210
182	90	170
183	80	310
184	90	170
185	67	15
186	50	255
187	68	355



TAJO 1712 2SW1		
Dato estructural	Dip	dip direction
188	60	150
189	65	135
190	80	185
191	65	100
192	90	170
193	60	220
194	90	170
195	70	63
196	90	310
197	60	170
198	75	155
199	48	165
200	90	170
201	45	160
202	30	165
203	90	170
204	75	10
205	68	100
206	70	320
207	55	205
208	25	355
TAJO 1712 1SW3		
Dato estructural	Dip	dip direction
209	65	360
210	90	170
211	73	170
212	55	220
213	68	200
214	75	25
215	85	350
216	65	225
217	20	230
218	80	315
219	80	345
220	75	100
221	20	125
222	75	275
223	70	120
224	55	220

TAJO 1712 1NW1		
Dato estructural	Dip	dip direction
225	75	190
226	77	145
227	50	235
228	80	190
229	76	165
230	90	170
231	60	285
232	75	25
233	80	340
234	70	160
235	25	160
236	70	340
237	75	15
238	40	160
239	85	170
TAJO 1712 1NW2		
Dato estructural	Dip	dip direction
240	78	145
241	74	265
242	68	35
243	90	170
244	85	315
245	68	150
246	55	180
247	90	170
248	25	230
249	43	330
250	90	170
251	78	265
252	20	235
253	15	20
254	73	40
255	75	50
256	20	255
257	63	340
258	75	225
259	85	350
260	25	355
261	20	255



TAJO 1712 1NW3		
Dato estructural	Dip	dip direction
262	70	300
263	65	220
264	45	170
265	60	360
266	35	335
267	40	240
268	68	355
269	90	170
270	80	285
271	85	215
272	65	215
273	90	170
274	90	170
275	34	215
276	22	230
277	32	250
278	90	170
279	76	165
280	90	170
281	60	285
282	75	25
TAJO 1712 3NW1		
Dato estructural	Dip	dip direction
283	26	35
284	44	20
285	90	170
286	28	260
287	21	40
288	90	170
289	25	290
290	90	170
291	31	180
292	90	170
293	53	265
294	40	170
295	90	170
296	90	170
297	38	140

TAJO 1712 3NW1		
Dato estructural	Dip	dip direction
298	68	5
299	90	170
300	40	35
301	80	200
302	35	5
303	34	215
304	22	230
305	32	250
TAJO 1712 3NW2		
Dato estructural	Dip	dip direction
306	90	170
307	90	170
308	90	170
309	56	315
310	65	220
311	52	190
312	40	178
313	35	95
314	65	180
315	90	170
316	45	160
317	80	90
318	50	235
319	46	210
320	38	140
321	73	330
322	56	115
TAJO 1712 3NW1		
Dato estructural	Dip	dip direction
323	80	245
324	45	90
325	45	230
326	90	170
327	70	210
328	90	170
329	80	310
330	90	170
331	65	180



TAJO 1712 3NW3		
Dato estructural	Dip	dip direction
332	67	15
333	50	255
334	90	170
335	70	5
336	65	25
337	90	170
338	90	170
339	45	85
340	90	170
341	80	5
342	90	170
343	80	170
344	65	180
345	60	10
346	58	90
347	90	170
348	35	250
349	90	220
350	20	230
351	80	315
352	80	345
353	75	100
354	20	125
TAJO 1712 4NW3		
Dato estructural	Dip	dip direction
355	65	240
356	45	0
357	60	175
358	35	220
359	70	200
360	35	250
361	40	0
362	35	2
363	75	200
364	80	85
365	65	310
366	50	350
367	80	345

TAJO 1712 4NW3		
Dato estructural	Dip	dip direction
368	45	5
369	35	90
370	62	165
371	63	160
372	48	140
373	41	165
374	70	190
375	20	60
376	46	210
377	38	140
378	73	330
379	56	115
TAJO 1712 5NW1		
Dato estructural	Dip	dip direction
380	67	220
381	45	360
382	90	170
383	58	200
384	40	180
385	60	165
386	60	70
387	60	340
388	40	178
389	35	95
390	65	180
391	90	170
392	85	315
393	68	150
394	55	180
TAJO 1712 5NW2		
Dato estructural	Dip	dip direction
395	55	180
396	60	285
397	75	245
398	65	5
399	90	170
400	35	295
401	55	180



TAJO 1712 5NW2		
Dato estructural	Dip	dip direction
402	30	260
403	90	170
404	35	255
405	35	100
406	30	250
407	38	85
408	90	170
409	90	170
410	90	170
411	90	170
412	75	200
413	80	85
TAJO 1712 4NE3		
Dato estructural	Dip	dip direction
414	75	230
415	35	285
416	40	235
417	70	240
418	35	100
419	30	250
420	38	85
421	65	310
422	50	350
TAJO 1712 4NE2		
Dato estructural	Dip	dip direction
423	45	0
424	15	70
425	75	15
426	55	180
427	35	260
428	38	190
429	90	170
430	90	170
431	76	150
432	15	175
433	35	100

TAJO 1712 4NE2		
Dato estructural	Dip	dip direction
434	70	105
435	70	260
436	30	250
437	38	85
TAJO 1712 4NE1		
Dato estructural	Dip	dip direction
438	75	175
439	20	265
440	60	150
441	45	195
442	85	105
443	60	15
444	80	360
445	35	205
446	75	190
447	70	290
448	65	210
449	60	195
450	80	265
451	40	5
452	90	170
453	90	170
454	55	110
455	75	15
456	55	180
457	35	260
TAJO 1712 3NE1		
Dato estructural	Dip	dip direction
458	20	90
459	90	170
460	40	245
461	90	170
462	68	170
463	58	230
464	90	170
465	35	260



TAJO 1712 3NE1		
Dato estructural	Dip	dip direction
466	15	235
467	41	120
468	90	170
469	90	170
470	60	175
471	40	25
472	45	200
473	90	170
474	90	170
475	30	45
476	45	140
477	37	180
478	55	0
479	60	285
480	75	245
CS 1712 N		
Dato estructural	Dip	dip direction
481	60	15
482	70	295
483	65	75
484	70	135
485	35	70
486	80	160
487	80	335
488	45	80
489	90	170
490	85	5
491	45	135
492	53	37
493	57	360
494	70	20
495	80	75
496	73	330
497	56	115
498	35	70

TAJO 1712 2NE1		
Dato estructural	Dip	dip direction
499	72	330
500	60	205
501	85	195
502	90	170
503	90	170
504	84	45
505	66	80
506	78	240
507	71	199
508	4	80
509	60	215
510	90	170
511	45	70
512	35	75
513	70	290
514	65	210
515	60	195
TAJO 1712 1SE1		
Dato estructural	Dip	dip direction
516	90	170
517	90	170
518	30	260
519	49	45
520	32	10
521	40	345
522	52	260
523	90	170
524	35	265
525	60	115
526	80	335
527	90	170
528	62	185
529	40	190
530	90	170
531	80	70



TAJO 1712 ISE3		
Dato estructural	Dip	dip direction
532	50	115
533	70	0
534	70	230
535	55	185
536	80	140
537	80	160
538	63	322
539	90	170
540	75	187
541	50	310
542	78	350