

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR
MINERO DE CIEN PESOS DEL MUNICIPIO DE MARMATO.**



AUTORES
LUISA FERNANDA CASTRO ORTIZ
DAVID ZAPATA CORREA

**UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE GEOLOGÍA
MANIZALES.
2018**

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR
MINERO DE CIEN PESOS DEL MUNICIPIO DE MARMATO.**



AUTORES
LUISA FERNANDA CASTRO ORTIZ
DAVID ZAPATA CORREA

**UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE GEOLOGÍA
MANIZALES.
2018**

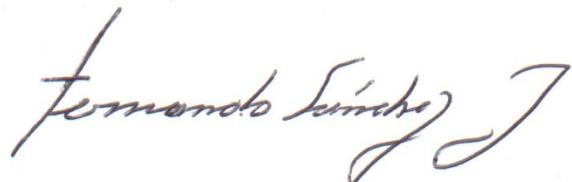
Nota de Advertencia: Artículo 23 de la Resolución N° 13 de Julio de 1946.

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y por qué las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

Apreciado Decano:

La presente comunicación con el fin de manifestar mi conocimiento y aprobación del trabajo de grado titulado “CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR MINERO DE CIEN PESOS DEL MUNICIPIO DE MARMATO”, elaborada por los estudiantes LUISA FERNANDA CASTRO ORTIZ, C.C 24743137 y DAVID ZAPATA CORREA, C.C. 1060650418 y presentado como requisito para optar al título de Profesional en Geología.

Cordialmente,



FERNANDO DE JESUS SANCHES Z
Director de Trabajo de Grado

DEDICATORIA:

Dedicado a nuestras familias que son nuestro principal apoyo, no solo en lo profesional, sino también en nuestras vidas personales.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos, primeramente a Dios por habernos guiado a lo largo de nuestra carrera, por ser nuestra fortaleza en los momentos difíciles y por brindaros una vida de oportunidades, aprendizajes y experiencias.

A nuestros padres JOSÉ BERNARDO CASTRO MARÍN y GLORIA AMPARO ORTIZ CASTRO; JAIME ZAPATA CORREA y ROSALBA CORREA SANCHEZ por el incondicional apoyo que nos brindaron, por los valores inculcados y por darnos la oportunidad de llegar hasta este punto de nuestras vidas.

A nuestros hermanos, sobrinos y demás familiares que en todo momento estuvieron de nuestro lado alentándonos y fortaleciéndonos en los momentos difíciles de nuestra carrera.

A nuestro Director Fernando Sánchez (*Fercho*) por la confianza, apoyo, dedicación, empeño y compartirnos su experiencia y conocimientos.

A Nicolás Giraldo, Yamid Ammar, Bertulfo Morales, Alberto Valencia, Elkin Ortiz, Hernán Cañas, Guillermo Ortiz, Jair Castro, Bernardo Castro y a todos los mineros por creer en nosotros y brindarnos el apoyo necesario para el desarrollo de la presente investigación.

A Ober Ayala por su acompañamiento e incondicional ayuda para la realización de este importante trabajo investigativo.

A todos nuestros amigos y compañeros.

ÍNDICE

	Pág.
1 CAPÍTULO I.....	17
1.1 RESUMEN	17
1.2 INTRODUCCIÓN	17
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos:	19
1.4 LOCALIZACIÓN	20
1.5 RESEÑA HISTÓRICA DE MARMATO – CALDAS.....	23
1.6 PROBLEMÁTICA DEL SECTOR MINERO DE CIEN PESOS.	24
2 CAPITULO II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	26
2.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	26
3 CAPITULO III MARCO GEOLÓGICO	29
3.1 GEOLOGÍA REGIONAL	29
3.1.1 Formación Amaga.....	29
3.1.2 Formación Combia.....	29
3.1.3 Diques y Silos Andesíticos.....	29
3.1.4 Rocas hipo-abisales porfiríticas.....	29
3.1.5 Pórfidos andesíticos.....	30
3.1.6 El complejo Quebradagrande.....	30
3.1.7 El Complejo Arquía	30

3.2	GEOLOGÍA LOCAL.....	31
3.2.1	Geología sector Cien Pesos.....	32
4	CAPÍTULO IV CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOZO DEL SECTOR DE CIEN PESOS – MARMATO.....	37
4.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MINAS ESTUDIADAS EN EL SECTOR MINERO DE CIEN PESOS.....	37
4.1.1	Mina La Mona.....	37
4.1.2	Mina La Carbonera.....	38
4.1.3	Mina La Golondrina	39
4.1.4	Mina La Pinta	40
4.1.5	Mina La Ratonera Baja.....	40
4.1.6	Mina La Uno.....	41
4.1.7	Mina La Morena	42
4.1.8	Mina la Torre 1	43
4.2	ANÁLISIS DE PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA	44
4.2.1	Diagrama de Contornos	44
4.2.2	Diagrama de Polos	44
4.3	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO	45
4.3.1	Clasificación Geomecánico RMR	45
4.3.1.1	Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.....	47
4.3.1.2	R.Q.D. Grado de fracturación del macizo rocoso.....	52
4.3.1.3	Espaciado de las discontinuidades.....	54
4.3.1.4	Condiciones de las discontinuidades.....	56

4.3.1.5	Presencia del Agua.....	63
4.3.2	Orientación de las discontinuidades.....	64
4.3.3	Clasificación geomecánica sistema q.....	67
5	CAPITULO V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	77
5.1	DISCUSIONES.....	77
5.2	CONCLUSIONES.....	78
5.3	BIBLIOGRAFÍA	79
6	ANEXOS	81

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Localización en X, Y, Z de las minas ubicadas en el sector de Cien Pesos. Marmato (Caldas).....	22
Tabla 2. Evaluación de la calidad de las rocas.	47
Tabla 3. De valores promedio de la resistencia de la roca, macizo rocoso de Cien Pesos, obtenidos mediante la utilización de esclerómetro (Metodología de Schmidt).	49
Tabla 4. Jv= número de las discontinuidades por metro cubico.	52
Tabla 5. Tabla de valores promedio del grado de fracturación del macizo rocoso de Cien Pesos.	53
Tabla 6. La separación o el espaciamiento de las discontinuidades.....	54
Tabla 7. Tabla de valores promedio del espaciado de las discontinuidades del macizo rocoso de Cien Pesos.	55
Tabla 8. Persistencia	56
Tabla 9. Rugosidad.....	57
Tabla 10. Apertura	58
Tabla 11. Relleno.....	59
Tabla 12. Alteración	60
Tabla 13. Tabla de valores promedio de las condiciones de las discontinuidades del macizo rocoso de Cien Pesos.....	62
Tabla 14. Presencial del agua por el caudal	64

Tabla 15. Clasificación del agua en cada una de las minas evaluado por sectores.....	64
Tabla 16. Orientación de las discontinuidades	64
Tabla 17. Tabla de valores promedio de la evaluación RMR del macizo rocoso de Cien Pesos	65
Tabla 18. R.Q.D Índice de calidad de la roca.....	67
Tabla 19. Calidad el macizo rocoso	68
Tabla 20. Jn Índice de diaclasado que indica el grado de fracturación.....	68
Tabla 21. Tamaño de bloque (R.Q.D./Jn)	68
Tabla 22. Jr. Índice de que contempla la rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades.	69
Tabla 23. Ja Índice de alteración de las discontinuidades.	70
Tabla 24. Resistencia al corte entre los bloques (Jr/Ja)	70
Tabla 25. Jw. Coeficiente reductor por la presencia de Agua.....	71
Tabla 26. SRF (Stress reduction factor) Coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional sobre el macizo rocoso.	72
Tabla 27. Tensión del macizo rocoso (Jw/SRF).....	72
Tabla 28. Valores promedios de cada una de las minas del macizo rocoso de Cien Pesos por el método Q	73
Tabla 29. Tabla resumen de la evaluación RMR Y Q	76
Tabla 30. Índice RMR Y Q	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación zona de estudio, Marmato-Caldas, Sector cien pesos	21
Figura 2. Fotografía que muestra desde la cabecera municipal el sector minero de Cien Pesos y sus respectivas minas.	22
Figura 3. Representación de mineralizaciones filonianas en pórfido andesítico-dacítico de pirita, calcopirita, cuarzo, galena, esfalerita y calcita.....	33
Figura 4. Representación de las alteraciones de óxidos en el pórfido andesítico-dacítico.	34
Figura 5. Representación de mineralización de calcita en la superficie del pórfido andesítico-dacítico.....	34
Figura 6. Representacion de esquisto grafitoso con venas de cuarzo lechoso, de color negro y lustre graso. En contacto con el pórfido andesítico- dacítico	35
Figura 7. Fotografía de la boca mina la mona, base Oeste del macizo rocoso de Cien Pesos.	38
Figura 8. Fotografía de la boca mina la carbonera, base Este del macizo rocoso de Cien Pesos.	39
Figura 9. Fotografía tomada en la mina La Golondrina, se observa en unas de sus guías las alteraciones de la roca y el diámetro de sí misma	39
Figura 10. Fotografía del método de trasporte del material de las minas que están en las partes altas.....	40

Figura 11. Mantenimiento del socavón por el método de entibado.....	41
Figura 12. Fotografía tomada en la mina La Uno, en uno de sus frentes principales, se puede observar de color más oscuro el esquisto grafitoso y en color más claro el pórfito dacítico-andesítico.....	42
Figura 13. Fotografía tomada en la mina la Torre 1, se nota el contacto entre los dos cuerpos rocosos, en la parte superior se encuentra descansando sobre el pórfito, el esquisto grafitoso con un rumbo de 240 y buzamiento de 75 (regla de la mano derecha).	43
Figura 14. <i>Diagrama de contornos, representación de las familias de diaclasas</i>	44
Figura 15. Diagrama de concentración de polos.....	45
Figura 16. Formato original de mapeo geomecànico RMR (1989).	46
Figura 17. A la izquierda grafico para corregir el impacto del esclerómetro según su ángulo, a la derecha modelo de esclerómetro utilizado para la investigación.....	48
Figura 18. Fotografía tomada en la mina la pinta se observa el espaciamiento de una de las caras de las diaclasas evaluadas.	54
Figura 19. Fotografía tomada en la mina la mona, se observa la persistencia.	56
Figura 20. Fotografías tomadas en la mina la Uno, se observa la rugosidad de las discontinuidades.	58
Figura 21. Fotografías tomadas en la mina la Ratonera Baja, se observa la apertura o aperturas de las discontinuidades.....	59

Figura 22. Fotografías tomadas en la mina la Pinta, se observa el relleno de las discontinuidades	60
Figura 23Fotografías tomadas en la mina la Pinta, se observa la alteración de las discontinuidades	61
Figura 24. Fotografías representativas del sector minero de Cien Pesos, donde se muestra parámetros base para la evaluación del macizo rocoso (flujo de agua, agrietamiento, Dirección de discontinuidades entre otros)	73
Figura 25. Diagrama en círculo: Promedio de calificación del macizo rocoso de Cien Pesos, evaluados por las normas RMR Bieniawski (1979) (ROCK MASS RATING) y Q Barton (1974). (QUALITY INDEX)	75

LISTA DE GRÁFICOS

Pág.

Gráfico 1. Evaluación de las resistencias de las rocas en el macizo rocoso de Cien Pesos, mostrando la variación por mina y de litología. Del lado izquierdo las minas con cotas más bajas y hacia la derecha las minas con cotas más altas.....	50
Gráfico 2. En este diagrama se hace la valoración según el primer parámetro evaluado por la metodología RMR (Resistencia a la compresión simple). Ábaco 1 mina la Torre 1, ábaco 2 mina la Carbonera, ábaco 3 mina la Golondrina, ábaco 4 mina la Pinta, ábaco 5 mina la Mona, ábaco 6 mina la Morena, Abaco 7 mina la Ratonera Baja y ábaco 8 mina la Uno.	51
Gráfico 3. Evaluación del grado de fracturación de las rocas en el macizo rocoso de Cien Pesos, mostrando la variación por mina y de litología. Del lado izquierdo las minas con cotas más bajas y hacia la derecha las minas con cotas más altas.....	53
Gráfico 4. Evaluación del espaciado de las discontinuidades de las rocas en el macizo rocoso de Cien Pesos, mostrando la variación de litología por mina. Del lado izquierdo las minas con cotas más bajas y hacia la derecha las minas con cotas más altas.....	56
Gráfico 5. Se muestra la distribución de las minas frente las condiciones de las discontinuidades.	63
Gráfico 6. Se muestra la distribución de las minas frente la norma RMR	66

Gráfico 7. Se observa la tendencia de cada una de las minas evaluadas por sectores con respecto a la profundidad.....	66
Gráfico 8. Valoración por mina.....	69
Gráfico 9. Comportamientos de las minas	71
Gráfico 10. Representativa en promedio de cada una de las minas, evaluado por la norma Q del macizo rocos de Cien Pesos.	74
Gráfico 11. Evaluación de la tendencia de Q de cada mina frente a la profundidad	74

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Modelo geológico	81
Anexo B. Modelo cartográfico	82
Anexo C. Modelo RMR	83
Anexo D. Modelo Q.....	84
Anexo E. Mina de la Mona	85
Anexo F. Mina la Carbonera	86
Anexo G. Mina la Golondrina	87
Anexo H. Mina la Pinta	88
Anexo I. Mina La Ratonera Baja	89
Anexo J. Mina La Uno.....	90
Anexo K. Mina la Morena.....	91
Anexo L. Mina La torre Uno	92

1 CAPÍTULO I.

1.1 RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la caracterización geomecánica del macizo rocoso del sector minero de Cien Pesos en Marmato-Caldas, el cual pertenece a la unidad geomorfológica Cauca Patía y su posición geográfica está bajo la influencia del sistema de falla del Cauca. Las rocas receptoras de la mineralización corresponden a las unidades litológicas de pórfito dacítico y pórfito andesítico. En la parte superior en forma de techo se encuentran esquistos grafitoso. Para llegar a las clasificaciones geomecánicas se ha realizado un estudio de estabilidad del macizo, utilizando las técnicas geológicas de cartografía detallada y determinación de las características necesarias para su clasificación geomecánica según los criterios ROCK MASS RATING propuesto por Bieniawski, (1989) y el sistema Q propuesto por Barton, Lien y Lunde (1974). Se analizaron alrededor de 698 diaclasas, con su respectiva evaluación. Una vez tabulada la información y obtenidos los resultados de las normas RMR Y Q y la respectiva evaluación del software Dips se determinaron dos familias de discontinuidades, las cuales se observan en los diagramas de densidad. Se pudo determinar que el macizo cuenta con una calidad MEDIA en la norma RMR y MALA en la norma Q.

1.2 INTRODUCCIÓN

Marmato es una población ubicada en la cordillera Occidental premiada por la naturaleza con minerales preciosos: oro y plata. Desde hace más de cinco siglos este lugar ha sido fuente de grandes hallazgos auríferos, pero también de las profundas excavaciones subterráneas emprendidas por el hombre en su ancestral lucha por dominar la tierra. Resulta interesante como estos aguerridos mineros perseveran en su empeño de crear nuevos socavones y sostener los ya existentes con sus propias manos, sin temor alguno, haciendo alarde de la gran habilidad adquirida a lo largo de los años y elaborando rudimentarias herramientas como martillos, picas y cinceles.

Si a esta absoluta precariedad de elementos de trabajo le añadimos los procedimientos de entibado, ausencia de ventilación, evaluación y pronósticos de estabilidad de las obras, podemos deducir que las excavaciones de túneles y galerías implicaron en la antigüedad una formidable labor, sacrificada y peligrosa. En la presente investigación se buscó conocer el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del sector minero de Cien Pesos en Marmato-Caldas, para garantizar la seguridad durante las labores de excavaciones mineras, a través de análisis de deformaciones, niveles de presiones, tensiones y esfuerzos. En nuestro país la industria minera constituye una de las principales ramas económicas que estimula el desarrollo de la industria y fortalece el crecimiento

económico y social. En los últimos años el aumento de obras civiles ha fortificado el estudio de los macizos rocosos con el objetivo de conocer cuáles son sus características y su comportamiento interno. Hoy en día cada entidad que esté relacionada con la construcción subterránea debe presentar su plan de estabilidad subterránea (estudio del macizo rocoso) del lugar de desarrollo de la obra, de acuerdo con la solicitud de la Agencia Nacional de Minería (ANM) en su decreto 1886 del año 2015.

En cuestión de clasificaciones Geomecánicas, se reconoce que fue Terzaghi (1946) quien propuso la primera clasificación de los macizos, orientada en la construcción de túneles. Sus datos provenían de túneles sostenidos principalmente por cerchas metálicas, bulonado y hormigón proyectado para usos civiles. Ahora conocemos como clasificaciones modernas los sistemas RMR (Bieniawski) y Q (Barton), que obtienen un mayor grado de objetividad. Los dos casos contienen atributos de combinación de factores del macizo rocoso (geológica, geomecánica y tensional) en un número único relacionado con la calidad global de la roca. A su vez, este número permite a través de la experiencia recogida en su utilización en casos reales, la definición de un sostenimiento del túnel y la estimación de otros parámetros o datos de interés (resistencia del macizo rocoso, tiempo de estabilidad de una excavación no sostenida, etc.).

El método *Rock Mass Rating* (RMR) fue desarrollada por Bieniawski (1972) donde permitió de forma sencilla, estimar la calidad del macizo rocoso, mediante la cuantificación de parámetros de fácil medición, los cuales se establecen en el campo de manera rápida¹. El método RMR incluye los siguientes parámetros: resistencia a la compresión uniaxial de la roca, *Rock Quality Designation* (RQD), espaciamiento de discontinuidades, condición de las discontinuidades, condición del agua subterránea y orientación de las discontinuidades. Con el valor del RMR es posible establecer algunas propiedades geotécnicas preliminares del macizo, para analizar la estabilidad del talud del frente de explotación actual.

El sistema Q, fue propuesto por Barton et al. (1974), basándose en una gran cantidad de casos tipo de estabilidad en excavaciones subterráneas, siendo su principal propósito establecer un índice para determinar la calidad del macizo rocoso en túneles². El sistema Q incluye parámetros como el índice de calidad de la roca (RQD), número de sistemas de las discontinuidades (Jn), rugosidad de las discontinuidades (Jr), alteración de las discontinuidades (Ja), factor de reducción por agua en las discontinuidades (Jw), y el factor de reducción por esfuerzos (SRF). El valor numérico del índice Q se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = (RQD/Jn) * (Jr/Ja) * (Jw/ SRF).$$

¹ Carrillo Maureen et al, L. L. Clasificación geo mecánica y análisis de estabilidad. Revista Geológica de América, 6., 2002

² Ibíd. 1

Actualmente existen insuficiencias en el alcance y contenido de estos estudios, por cuanto aún persisten problemas de estabilidad relacionados directamente con el costo de sostenimiento de túneles, en razón a que los macizos rocosos no han sido objeto de un estudio que determine las políticas para adopción de medidas de prevención y mantenimiento, dando lugar a que se presente una misma litología en la excavación subterránea, como afectaciones por eventos tectónicos o bien porque la zona de influencia ha sido objeto de trabajos por el método de arranque que consiste en su fortificación posterior a la perdida de estabilidad o simplemente porque se fortifica toda la excavación “preventivamente” considerando que el comportamiento del macizo será similar en todos los casos, más la práctica demuestra que siempre no es así en el último caso.

Uno de los problemas álgidos de esta investigación radica en la insuficiencia, alcance y contenido de los procedimientos que actualmente se aplican para el estudio de los macizos rocosos, en razón a que estos no son diferenciados geotécnicamente por lo que en muchos casos se aplican soluciones incorrectas generando consecuentemente gastos excesivos y afectación de la seguridad de los trabajadores.

Una de las grandes hipótesis que plantea este trabajo parte de la premisa de que si se realiza la caracterización Geomecánica del macizo rocoso, es posible su diferenciación de acuerdo a su comportamiento, permitiendo de esta manera generar soluciones más económicas y seguras de proyectos para construcción de obras subterráneas de minería.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general:

Caracterización geomecánica del macizo rocoso del sector minero de Cien Pesos en el municipio de Marmato, generando un mapeo geomecánico de las minas y proponiendo una evaluación en modelo 3D.

1.3.2 Objetivos específicos:

- 1.** Realizar el estudio geológico del macizo rocoso y determinar los parámetros geomecánicos del mismo.
- 2.** Elaborar mapeos geomecánicos en modelos 3D, para la evaluación del macizo rocoso estableciendo criterios geomecánicos, estructurales que permitan un mejor diseño de excavaciones y obras subterráneas.
- 3.** Establecer similitudes y diferencia con respecto a los métodos de evaluación geomecánico con las normas RMR (Bieniawski) & Q (Barton).

En el primer capítulo, introducción del tema, se evalúa el estado actual de la zona de estudio y se genera una visión de los objetivos de la investigación. Se describe su ubicación y se identifican los principales socavones o minas del sector. Se hace una breve reseña histórica de la explotación minera en Marmato, Caldas; se

analiza la evolución de este sector de la economía incluyendo obras de ingeniería y métodos de explotación. Así mismo se abre un paréntesis sobre la problemática socio-ambiental como consecuencia de la explotación aurífera.

El capítulo segundo trata de la metodología de trabajo, las etapas involucradas en la representación geomecánica y se hace un corto resumen sobre las normas RMR (Bieniawski) & Q (Barton).

El tercer capítulo se refiere al análisis de la geología, su aspecto regional y local, enfocado en la geología que predomina en el sector minero de Cien Pesos, municipio de Marmato.

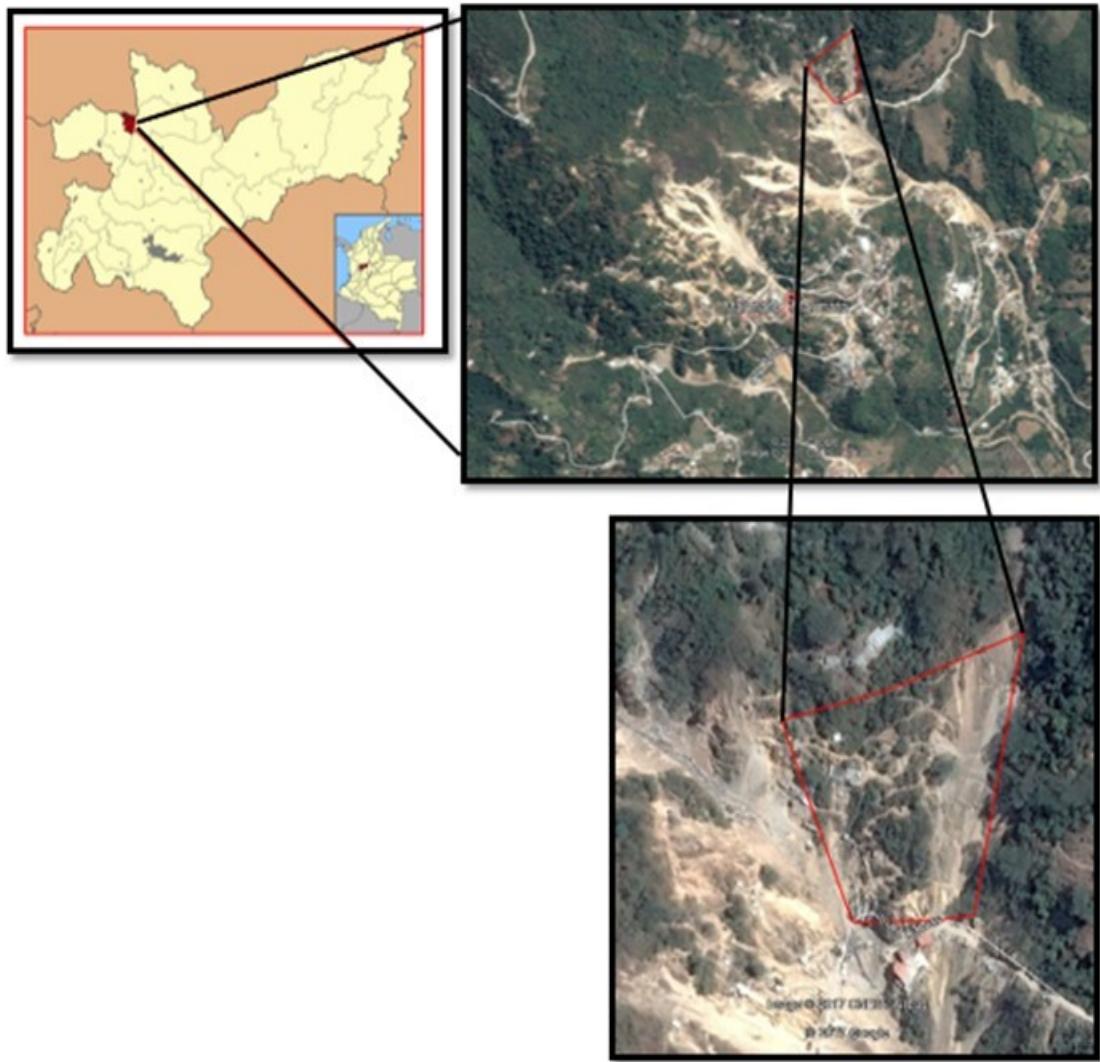
Por su parte el capítulo cuarto se refiere al análisis de los resultados obtenidos en la caracterización geo-mecánica; a los resultados del estudio ingeniero-geológico determinando las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso. Se incluye además un mapeo geomecánico en modelo 3D de cada una de las normas.

Finalmente en el quinto capítulo se exponen los criterios geomecánicos para el diseño de las excavaciones, las recomendaciones y las conclusiones del talud.

1.4 LOCALIZACIÓN

Marmato se ubica en el flanco oriental de la cordillera occidental, al occidente del relieve conocido como “Macizo de los Mellizos”, en la vertiente occidental del río Cauca. La zona analizada, cuenta con un área aproximada de 14.123 m² y un perímetro de 488 m, se encuentra a 0.5 kilómetros de la cabecera municipal, al margen izquierdo del carreteable que conduce a la vereda Cabras, con alturas que oscilan desde los 1363 hasta los 1500 m.s.n.m.

Figura 1. Ubicación zona de estudio, Marmato–Caldas, Sector cien pesos.



Fuente: Google Earth 7/29/2014

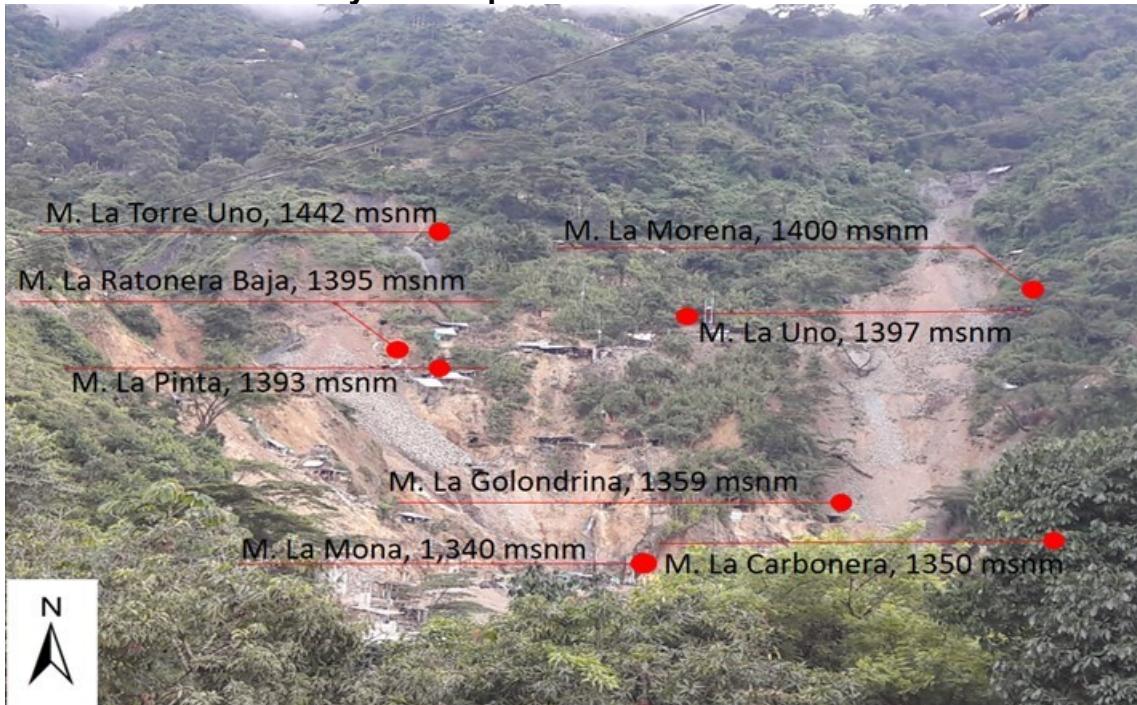
El sector de Cien Pesos, no obstante su corta extensión, se considera una zona de buena extracción aurífera, en donde operan 16 bocaminas, de las cuales 8 se encuentran geo-referenciadas por ser las más activas (Tabla 1).

Tabla 1. Localización en X, Y, Z de las minas ubicadas en el sector de Cien Pesos. Marmato (Caldas).

Nombre	Coordinada X	Coordinada Y	Cota (m.s.n.m)
La Mona	831.271	1.097.907	1340
La Carbonera	831.314	1.097.916	1350
La Golondrina	831.296	1.097.941	1359
La Pinta	831.191	1.097.966	1393
La Ratonera Baja	831.189	1.097.963	1395
La Uno	831.211	1.097.982	1397
La Morena	831.302	1.098.074	1400
La Torre Uno	831.144	1.098.059	1442

Fuente: el autor, 2018

Figura 2. Fotografía que muestra desde la cabecera municipal el sector minero de Cien Pesos y sus respectivas minas.



Fuente: El autor ,2018

1.5 RESEÑA HISTÓRICA DE MARMATO – CALDAS.

El vocablo Marmato se deriva de marmaja nombre que recibe la pirita, mineral rico en hierro que nuestros aborígenes, los Indios Cartama, la procesaban en piedras de moler. Según los cronistas de conquista, la principal fuente de trabajo de esta tribu era la extracción de oro; vivían en un poblado rodeado de maizales y selvas en pequeñas casas construidas con materiales de la región, entre ellos la guadua³.

Marmato desde la época de la conquista generó nuevas formas de explotación del trabajo como la esclavitud, servidumbre y la encomienda, bajo un orden colonial. Esto dio paso a nuevas jerarquías sociales y formas políticas basadas en la clasificación social en donde la mano de obra principal para la actividad minera en Marmato eran los indígenas, en un principio, y más adelante ingresó la fuerza de trabajo de esclavos negros. A partir de la época de la Independencia las minas de Marmato, cumplen una función importante en el financiamiento de la Gran Colombia, ya que Bolívar y Santander consiguieron préstamos con bancos ingleses y dejaron como garantía de pago las minas de Marmato por un tiempo de casi 100 años⁴ Con las minas de Marmato como garantía de pago para los bancos ingleses, entran en la historia de la minería de esta región las compañías inglesas, las cuales básicamente tecnifican y dirigen la producción del oro. Las minas de Marmato y los trabajadores de las minas entran a un nuevo imperio financiero y comercial, todo esto basado en un monopolio económico y de expansión territorial.

Para el año de 1905, el General Vásquez Cobo celebró el contrato con el Gobierno Nacional de arrendamiento de los distritos mineros de Supía, Marmato, Ríosucio, San Clemente, Apía y Anserma viejo⁵, pero este arrendamiento no duró mucho puesto que el General hizo traspaso de las minas a una compañía inglesa, nuevamente, esto es un claro ejemplo de las relaciones internacionales de poder y en las relaciones internas dentro de los países, lo que hace que sea una dependencia histórica-estructural del país ya entrado en el siglo XX. La historia de Marmato permite analizar la dependencia económica que ha tenido la pequeña minería frente a corporaciones de capital extranjero hasta hoy en día. Estos serán los puntos de análisis y de partida para cada uno de los momentos o acontecimientos importantes en las relaciones productivas de la pequeña minería.

Durante casi todo el siglo XIX el oro fue el principal producto de exportación y permitió equilibrar la vacilante balanza de comercio. Este metal además de la plata y el platino, atrajeron casi desde el comienzo de la República a inversionistas

³ DÍAS LÓPEZ & URIBANA RANGEL. Reseña histórica Marmato Caldas. Bogotá: Republica de Colombia, 1989

⁴ Ibid 2

⁵ MORA. Los blancos en la sociedad colonial venezolana: Representaciones sociales e ideología. (En línea) 2011. (Consultado el 17 de enero de 2018) http://scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1011-22512011000200008

extranjeros que trajeron capital y tecnología. Con ellos vinieron a lo largo de los años el molino californiano, la amalgamación con mercurio, la cianuración, la topografía de precisión, la química metalúrgica, la turbina pelton, las bombas hidráulicas, la máquina de vapor, la dinamita, la draga de ríos, el monitor hidráulico y muchas otras innovaciones tecnológicas que iban apareciendo en el mundo. En Antioquia y en el Cauca surgieron también empresarios mineros colombianos que aprendieron y lograron con éxito fundar sus empresas y hacerlas crecer a medida que el mercado lo requería. La legislación minera regulaba entonces la producción y explotación de los recursos, los inversionistas extranjeros, arremetía contra los pequeños mineros, como en el caso de Marmato practicaban la minería artesanal, ahora denominada, minería ilegal⁶.

1.6 PROBLEMÁTICA DEL SECTOR MINERO DE CIEN PESOS.

Una de las grandes problemáticas que afecta no solo a este sector, sino al municipio en su conjunto está relacionada con el impacto ambiental. Toda actividad minera genera grandes efectos nocivos para el medio ambiente, siendo la minería a gran escala quizá la que genere los peores desastres ecológicos como la contaminación del aire, de los afluentes y la modificación de la geomorfología, consecuencias que difícilmente se podrían reparar.

Igualmente la contaminación por cianuro y mercurio usados en los procesos de explotación y extracción de metales preciosos perjudica el suelo, el subsuelo, el agua y el aire, afectando por consiguiente la flora y la fauna del territorio y claro está perjudicando la salud de toda una comunidad.⁷

Marmato es uno de los pequeños pueblos mineros en donde desde que se ingresa allí, se evidencia el fuerte impacto ambiental provocado por la incesante actividad minera. No dispone de los controles básicos de estabilidad minera o conceptos geotécnicos. Esta razón es la causa de una problemática que parte desde un nivel básico de seguridad para el minero generando riesgos de pequeña a gran escala. Muy poco es lo que se conoce sobre los procesos geotécnicos que influyen en el cerro de Marmato, constituyéndose así en un área de la investigación poco generalizada. El desconocimiento de esta situación, es un problema a la hora de proponer minería subterránea. Es entendible que la dinámica de la tierra varía a través del tiempo (esfuerzos tectónicos, sismos y la influencia de la minería sobre el macizo) y que esto ha generado una zona variable en términos de estabilidad. Para el análisis de esta problemática el plan de sostenimiento minero del decreto No. 1886 del 21 de septiembre del 2015, establece: Acciones y dispositivos aislados o estructuras de cualquier naturaleza que sirven para mantener en

⁶ DÍAS LÓPEZ & URBANA RANGEL. Reseña histórica Marmato Caldas. Bogotá: Republica de Colombia, 1989

⁷ DÍAS, A. J. (2013). Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato Caldas. . (En línea) 2013. (Consultado el 17 de enero de 2018), de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/730>

actividad abierto los espacios de la labor minera subterránea con una sección suficiente para la circulación del personal, del aire y el tráfico o transporte de equipos. Además, tiene por finalidad impedir derrumbe de los techos y paredes, mantener la cohesión de los terrenos y evitar la caída de roca de cualquier dimensión. Así mismo, se refiere al uso estructural de ciertos elementos para controlar la deformación o la caída de roca del techo o paredes en las labores mineras subterráneas.

Tras la gran problemática ambiental común en todo el territorio marmateño, Cien Pesos sufre un inconveniente adicional relacionado con la falta de reconocimiento como sector minero por parte del Estado en la cartografía colombiana. Esta división territorial es catalogada en la actualidad como pequeña minería ilegal.

Sin embargo se conocen registros del área de cien pesos, distribuidos por el Ministerio de Minas a través de MINERCOL en el año 1996. En este caso se definió, en un polígono, una zona de reserva sobre la parte alta del área de Marmato, denominándola “zona de exclusión” dividida en: el Nivel Inferior, ubicándolo entre la empresa Mineros Nacionales y la cota 1363m.s.n.m; el nivel intermedio entre las cotas 1363 y 1500 m.s.n.m como sector Cien Pesos y un nivel superior entre las cotas 1500 y 1600 m.s.n.m considerado como el sector de Echandía, en donde se realiza explotación aurífera con más de 100 años de antigüedad.

Se pudo establecer durante la investigación, que mediante la ley 72 de 1939 se configuró un régimen jurídico especial para las minas de Marmato, disposición que fue reformada por la Ley 66 de 1946 y está a su vez por el Decreto 2223 de 1954. El régimen minero especial se basa desde la Ley 72 en la propiedad nacional sobre las minas de Marmato y Cien Pesos (salvo una mina en Echandía) y en el reconocimiento de la existencia de un sistema de pequeños contratos o contratos de laboreo en participación. La Ley 66 dividió el cerro de Marmato en dos zonas: la Zona Alta A, explotada por los mineros locales bajo pequeños contratos. Zona Baja B, que comprende dos grandes minas (La Palma y El Infierno), destinada a la mediana minería y que es contratada con un solo operador.

2 CAPITULO II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

2.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

La descripción y clasificación física y mecánica de un macizo rocoso es de suma importancia por la gran cantidad de obras que allí se desarrollan. Por estas razones se requiere la elaboración de una serie de estudios que determinen las características del material sobre el cual se han planificado dichos trabajos, relacionados en este caso, con obras de infraestructura o minería subterránea. Estos a su vez deben ser complementados con análisis geológicos locales y dependiendo de su magnitud, se podrían ampliar y desarrollar estudios regionales más profundos en donde se detallen aspectos típicos como fallas, pliegues, formaciones y otros.

La caracterización geomecánica facilita significativamente y hace más confiable el pronóstico sobre el comportamiento del macizo rocoso, ya que con ello se disminuye la probabilidad de que se produzcan afectaciones de diferente índole que puedan inferir negativamente sobre la economía así como en la estabilidad de las obras y la seguridad de sus trabajadores.⁸

Para realizar el proyecto trazado se emplea la metodología de trabajo integral en donde interviene como agente principal la investigación que consta de: trabajo; análisis estadísticos y experimentales.

Esta metodología puede ser aplicada en la caracterización geomecánica de macizos rocosos, tanto en obras subterráneas como de superficie. Esta técnica constituye un aporte científico ya que incluye aspectos novedosos de gran importancia como la evaluación y el pronóstico sobre el comportamiento de un macizo rocoso.

Los procesos enunciados en la misma se aplican por primera vez en el macizo rocoso de Cien Pesos. La propuesta supera cualitativa y cuantitativamente otros estudios propuestos en diferentes regiones del país.

A continuación, se relacionan las etapas de trabajo.

Primera etapa. Comprende el reconocimiento de la zona de estudio, en este caso “Cien Pesos” considerado un sector inmejorable para la caracterización geomecánica, ya que cuenta con criterios óptimos para la clasificación del macizo como las obras subterráneas de corta, mediana y larga extensión, morfología y comportamiento rocoso.

⁸ CARTAYA-PIRE, M.. Caracterización geo mecánica del macizo rocoso en obras subterráneas en el oriente del pais. Chile, 2001

En esta etapa se realizó la revisión bibliográfica necesaria acudiendo a las principales fuentes e instituciones conocedoras del tema; entre las que citamos: Alcaldía Municipal, Universidad de Caldas, Universidad Nacional de Colombia, Servicio Geológico Colombiano, Corporación autónoma regional de Caldas (Corpocaldas), Centro geotécnico internacional (CGI), Universidad Autónoma de Chihuahua (Facultad de ing. minas y metalurgia), en donde se analiza el estado actual de la temática en el país y en el resto del mundo.

Los trabajos efectuados en nuestro país relacionados con la minería proporcionaron parte de la información requerida para la caracterización del objeto de estudio, en este caso, los macizos rocosos. Las obras subterráneas analizadas con base en esta información fueron definitivas para determinar el conjunto de métodos de investigación aplicados en este proyecto.

Dentro de la literatura geológica nacional no se incluye información importante que reconozca el comportamiento del sector en lo geomecánico, no obstante que Marmato es considerado como una de las zonas mineras más antiguas del país.

Reconociendo el decreto de 1886 del 21 de septiembre del 2015, Título IV: Sostenimiento, Capítulo I generalidad del Artículo 76. Definición, implementación e inspección del plan de sostenimiento. El titular del derecho minero, el explotador minero y el empleador minero debe definir e implementar un plan de sostenimiento de la explotación, de acuerdo con el estudio geotécnico del área y con lo aprobado en el programa de trabajo y obras (P.T.O) del proyecto, cuando se trate de labores mineras.

Segunda etapa. En esta etapa se realizó el trabajo de campo que permitió obtener datos necesarios para la clasificación geomecánica del sector de Cien Pesos. Comprendió los siguientes aspectos.

1. Se elaboró la cartografía básica de las minas: La Mona, la Carbonera, la Golondrina, la Pinta, la Ratonera Baja, la Uno, la Morena, la Torre 1, con escala 1:200. realizando un levantamiento topográfico (cinta y brújula) del área de interés y de las propias minas así como el mapeo geomecánico, un modelo en 3D.
2. Se hizo la descripción del macizo, tipo de litología, tipo de mineralización, espesor de vetas, datos estructurales y alteraciones hidrotermales.

Con fundamento en la cartografía de las minas debidamente actualizada, se procedió a la toma de datos geomecánicos, tanto en superficie como subterráneos con una variación de cada punto de 10 a 15 metros, según la disposición del terreno y de la mina, para evaluar la resistencia de la roca por los parámetros RMR Bieniawski, (1989) y Q (Desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974). La

toma de datos se realizó tanto en superficie como subterráneo con una variación de cada punto de 10 a 15 metros según la disposición del terreno y de la mina.

Tercera etapa. Concluida la segunda etapa se procedió a organizar, analizar e interpretar la información recopilada en campo en donde se identificaron y se plasmaron las características más sobresalientes o relevantes del terreno y de las minas, estableciendo las evaluaciones integrales y diferenciadas correspondientes a las normas de estabilidad (RMR y Q) de las minas: La Mona, la Carbonera, la Golondrina, la Pinta, la Ratonera Baja, la Uno, la Morena, la Torre Uno. Generando bases de datos para futuras actividades mineras y un mapeo geomecánica en modelo 3D.

3 CAPITULO III MARCO GEOLÓGICO

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

3.1.1 Formación Amaga.

El levantamiento inicial de la Cordillera Occidental a finales del Cretáceo determinó el desarrollo embrionario de la fosa interandina del Cauca en la parte sur del país, en la cual se depositaron sedimentos marinos salobres durante el Eoceno Superior y el Oligoceno Inferior. A finales del Oligoceno superior los movimientos tecto-orogénicos acentuaron la depresión de dicha fosa permitiendo la acumulación de sedimentos continentales, una manifestación de los cuales son los conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas que afloran, circunscritos al cauce y a las vertientes del río Cauca.⁹

El miembro más representativo de la Formación Amaga en el Miembro Superior, la unidad que aflora en las vertientes aledañas al río Cauca, estando sus mejores exposiciones a lo largo de las carreteras Támesis, Valparaíso, La Felisa y Supía.¹⁰

3.1.2 Formación Combia.

La Formación Combia es una unidad que se extiende a lo largo de la parte media y alta del valle interandino del río Cauca entre las Cordilleras Central y Occidental en el noreste de Colombia, denominada inicialmente por Grosse (1926) como "Estratos de Combia" y redefinida estratigráficamente por González (1980) quien la dividió en dos miembros: Inferior o Volcánico y el Superior o Volcano-clástico. Sus afloramientos se presentan sobre las carreteras Jardín, La Felisa, Riosucio y sobre el río Riosucio.

3.1.3 Diques y Silos Andesíticos.

No son muy comunes en el área, pero si existen en ella intrusión de las rocas sedimentarias de la Formación Amagá y las rocas volcánicas de la Formación Combia. Representan los comienzos del volcanismo fisural ácido a intermedio que constituyó los grandes cuerpos andesíticos y dacíticos que afloran en el área, generalmente de forma cónica.¹¹

3.1.4 Rocas hipo-abisales porfiríticas.

Circunscritos a la cuenca del río Cauca existen una serie de cuerpos de sección semicircular, que resultan sobre la topografía suave característica de las zonas donde aflora La Formación Amagá o acentúan la topografía abrupta definida en ciertos lugares por la presencia de estratos de conglomerados y brechas de la

⁹ GONZALES & CALLE, B. C.. Geología y geomecánica de la plancha 186 Rio sucio. Bogotá : Instituto Colombiano de Minería Ingeominas, 1982

¹⁰ Ibíd. 8

¹¹ Ibíd. 8

Formación Combia. A veces se presentan como diques o silos emplazados en los sedimentos de la Formación Amagá. Dentro de estos cuerpos se han identificado dos facies de composición andesítica y dacítica, dentro de las cuales puede haber cambios gradacionales. Suelen estar muy meteorizadas dando lugar a un material arcilloso, de color pardo amarillento, dentro del cual se conservan cristales bipiramidales de cuarzo, cuando el saprolito proviene de la meteorización de una roca dacítica.¹²

3.1.5 Pórfidos andesíticos.

Son rocas de textura porfirítica con fenocristales de plagioclásas y hornblenda de hasta 2.5 cm de largo, empotrados en una masa afanítica de color gris claro. Dentro de los cerros constituidos por esta roca, parecen destacarse por la belleza de las forma externas e internas de la roca (tamaño de los fenocristales) los cerros Ingrumá, Batero, Carbuco y Gallo. Otros afloramientos de interés se presentan al oeste de Támesis en las áreas circunvecinas a la región de Marmato y al oeste del río Cauca. Dentro de estos cuerpos hay diferencias composicionales y de grado de alteración, que permiten subdividirlos por lo menos en dos tipos: pórfidos, andesíticos horbléndicos y porfídicos de Marmato.¹³

3.1.6 El complejo Quebradagrande.

Está constituido por una serie de bloques estructurales alineados Norte-Sur, cuya característica común es poseer una asociación de sedimentitas marinas y un basamento oceánico de edad Cretácica Temprana. Este conjunto litológico está empotrado entre dos bloques con basamento metamórfico: el Complejo Arquía al Occidente y el Complejo Cajamarca al Oriente. Una característica litológica del Complejo Quebradagrande, frecuentemente ignorada en los análisis de terrenos, es su carácter bimodal: con afinidad volcánica al oeste y continental al este. Los sectores más occidentales poseen material clástico conformado por andesitas, gabros, diabasas, tobas y rocas sedimentarias inmaduras; los bloques orientales (referidos frecuentemente a la "Formación Abejorral") poseen constituyentes de origen continental entre los que se incluyen esquistos y cuarcitas. Los datos son consistentes con la existencia de un bloque de origen continental que aportó detritos hacia la parte más oriental de la cuenca de Quebradagrande.

3.1.7 El Complejo Arquía.

Situado entre las Fallas Silvia- Pijao y Cauca- Almaguer, está constituido por rocas metamórficas de origen ígneo y sedimentario¹⁴ Las entidades litológicas incluidas dentro del Complejo para la región norte están: los Esquistos de Sabaletas, Esquistos anfibólicos del río Cauca, Grupo Arquía, Anfibolita Sausurítica de Chinchiná, Esquistos de Lisboa-Palestina, Neis de Chinchiná, Anfibolita

¹² Ibíd. 8

¹³ Ibíd. 8

¹⁴ GÓMEZ Y MAYA. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Bogotá: Boletín Geológico, Ingeominas V.35, pp.4357, 1995

Granatífera de Pijao, Complejo ígneo-metamórfico del río Rosario, Complejo Rosario, Grupo Bugalagrande, y Complejo Bolo Azul. Entre estas "unidades" se destacan verdaderos litodemas (ej. Anfibolita Granatífera de Pijao) y también suites o conjuntos de litodemas (ej. "Grupo Arquía", "Complejo Rosario"). El Complejo Quebradagrande y Arquía forman una estrecha faja situada en el margen occidental de la Cordillera Central.

La constitución de una unidad llamada "Complejo Arquía" tiene uso práctico en cartografía regional, sin embargo, no debemos olvidar que estamos ante una entidad heterogénea cuyo único carácter unificador es el de ser una faja de rocas metamórficas separadas de los Complejos vecinos por fallas regionales. Así el Complejo Arquía es realmente un conjunto de litodemas cuyos componentes son de orígenes y edades diversas. La edad del Complejo Arquía, entiéndase la amalgama de bloques en su disposición actual (o por defecto, el tiempo de la reunión de sus componentes), debe ser necesariamente más reciente que la de sus litodemas constituyentes. Algunas de los litodemas incluidos en el Complejo Arquía son metamórfitas de baja y media presión con edades isotópicas que sugieren un evento Cretácico Temprano.^{15 16 17}.

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

Marmato ha sido explotado exhaustivamente desde tiempos Precolombinos. Se encuentra localizado dentro de la unidad Geomorfológica Cauca Patía y su posición geográfica está bajo la influencia del sistema de fallas del Cauca, con dirección N-S predominantemente, esta hace parte del sistema de fallas de Romeral afectando el pie de monte de la cordillera occidental. El área pertenece al terreno Cauca - Romeral presentándose una diversidad de rocas en composición y origen.¹⁸

En el yacimiento aurífero de Marmato dentro de la Zona de Exclusión la roca receptora de la mineralización corresponde a la unidad litológica del pórfito Dacítico (Nad) controlada por una combinación de fallas y fracturas y relleno de venas principalmente de sulfuros. Las zonas mineralizadas están asociadas a fallas distensivas y relleno de fracturas con diseminaciones vetiformes a través de las rocas. En forma de estovercas y su variación en el rumbo se debe a efectos tectónicos post-mineralización.¹⁹

¹⁵ PARDO -TRUJILLO Y MORENO -SÁNCHEZ. Stratigraphical and sedimentological constrains on western Colombia: implications on the evolution of the Caribbean Plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. F. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: hydrocarbon habitats, basin. Manizales: memoir 79, pp. 891-924, 2003

¹⁶ RESTREPO J. et al, ;. Precisiones geocronológicas sobre el Occidente Colombiano.: Simposio sobre Magmatismo Andino y su marco tectónico. pp. 1-22, 1991

¹⁷ TOUSSAINT AND RESTREPO. (1989). Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. V Congreso Colombiano de Geología, pp. 127-147, 1989

¹⁸ Ibíd. 8

¹⁹ Ibíd. 8

La deposición de los minerales de mena y ganga en la zona de Marmato ocurre en tres fases las cuales identifican un mineral predominante así: Etapa temprana con pirita (Pyl), intermedia con esfalerita y la tardía con pirita (Py2) y carbonatos. La mineralización económica de este distrito (Au-Ag) se ha concentrado por lo general en las asociaciones paragenéticas tempranas y tardías.²⁰²¹.

3.2.1 Geología sector Cien Pesos.

Este macizo rocoso se encuentra delimitado: Norte: Vereda Echandía; Este Sector Llano Grande; Sur: Mineros Nacionales y Vereda el Llano; Oeste: la cabecera municipal.. Hidrológicamente hacia el N-Oeste se encuentra la quebrada Pantano (Mapa geológico, ANEXO A).

Se caracteriza por ser un macizo rocoso modernamente duro heterogéneo. La parte inferior se compone por un pórfido andesítico-dacítico meteorizados de color gris claro moteado a blanco y verde oscuro, con textura afanítica o porfirítica, con variación en la matriz y los fenocristales. El pórfido Andesítico ocasionalmente presenta inclusiones de epidota y cuarzo. El ferromagnesiano predominante es hornblenda remplazada en parte por clorita y calcita, conservando la forma tabular del cristal original. Como accesorios está el cuarzo, clorita, calcita, epidota y sericita. La pirita y la magnetita se presentan diseminados y reemplazando parcialmente la hornblenda. La matriz es holocristalina, equigranular compuesta por plagioclasas, calcita y minerales opacos (magnetita - ilmenita). Los pórfidos Dacíticos son rocas porfiríticas de color gris medio a claro. Los fenocristales son plagioclasas, cuarzo, hornblenda con alteración a sericita y alteraciones de goethita hematita y limonita.

Los pórfidos Andesítico y Dacíticos que afloran en el área de Cien pesos presentan varias mineralizaciones filonianas, con estructuras de filones paralelos y sub-paralelos predominantemente, filones en estoverca y filones ramificados Los filones presentan espesores variables desde (1cm hasta 30cm); la dirección controlada tectónicamente varia N65W y N40W; sus buzamientos son generalmente verticales. Los minerales metálicos en el interior de las vetas principales se presentan en venas e hilillos (pirita y esfalerita) o diseminados en la roca brechada (pirita, galena, calcopirita, esfalerita). Calcita y cuarzo son los minerales que aparecen como ganga (figura 3).

²⁰ Ibíd. 8

²¹ ÁLVAREZ J. ARIAS, A. Geología del Área de Marmato. Bogotá: Inst. Nat. de Inv. Geológico Mineras. Informe no. 1573. 1970

Figura 3. Representación de mineralizaciones filonianas en pórfido andesítico-dacítico de pirita, calcopirita, cuarzo, galena, esfalerita y calcita.



Fuente: autor, 2018

La alteración hidrotermal en la zona corresponde a la alteración filica a sericitica, producida por la alteración de plagioclasas y ferromagnesianos dominante en la parte más profunda de las minas, siendo las zonas más mineralizadas. La alteración propílica es caracterizada por la presencia de epidota y/o clorita. Comúnmente presenta también albita.

Figura 4. Representación de las alteraciones de óxidos en el pórfito andesítico-dacítico.



Fuente: autor, 2018

Figura 5. Representación de mineralización de calcita en la superficie del pórfito andesítico-dacítico.



Fuente: autor, 2018

En la parte superior se encuentran como techos pendientes sobre los pórpidos, los esquistos grafitoso. Ocasionalmente presentan venas de cuarzo lechoso con ligera piritización, capas laminadas, localmente bandedas. Su color es oscuro de lustre graso, untuoso al tacto, por lo general replegado (Imágenes 5).

Figura 6. Representacion de esquisto grafitoso con venas de cuarzo lechoso, de color negro y lustre graso. En contacto con el pórvido andesítico-dacítico
Fuente: autor, 2018



Origen y Edad. La presencia de fenocristales de vidrio volcánico en la matriz de algunos cuerpos indica un proceso de cristalización inicial lento a una profundidad mayor que la etapa durante la cual el enfriamiento fue rápido. Algunos fenocristales de cuarzo muestran formas redondeadas con entrantes y salientes lo que indica que estos reaccionaron con el magma residual durante las últimas etapas del emplazamiento, siendo parcialmente disueltos por él. Según ²² (figura 6).

La edad de estos cuerpos ha sido determinada mediante varias dataciones. Una muestra de pórvido andesítico hornblendico de la carretera La Felisa-Irra, analizada por el método K/Ar dio las siguientes edades: 6.8 ± 0.2 m.a. en biotita y

²² ÁLVAREZ, A. J. Geología de la Cordillera Central y el Occidente Colombiano y Petroquímica de los Intrusivos Granitoides Meso-Cenozóicos Universidad de Chile. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias con mención en Geología, 1979

7.1 ± 0.2 m.a. en horblenda²³ La muestra del Stock de Marmato, datada por el método K/Ar dio una edad de 6.3 ± 0.7 m.a.²⁴ opinan que estas edades adicionales a las que ya se tienen sobre otros cuerpos plutónicos y subvolcánicos a lo largo de la cordillera Occidental y de la fosa Cauca-Patía de edad Terciario Superior, definen un episodio magmático a finales del Mioceno probablemente y que originó el plegamiento andino y la Formación de la Cordillera Oriental colombiana.²⁵

²³ GONZÁLEZ, I. H. Geología del Cuadrángulo 3-8, Sonsón. Inst, Natl. de investigación Geológicas Mineras Inf. no. 170, 1976

²⁴ Ibíd. 20

²⁵ Ibíd. 8

4 CAPÍTULO IV CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR DE CIEN PESOS – MARMATO

El estudio se realizó en el macizo rocoso de Cien Pesos, en donde se encuentran obras subterráneas de gran importancia para los sectores socio-económicos y estructurales del municipio. Se trata de socavones que van desde pequeñas hasta grandes excavaciones de tipo artesanal. En el área correspondiente se encuentran ubicadas 16 bocaminas, de las cuales, en la primera etapa de la investigación, se recopilaron datos que no pudieron ser corroborados en la segunda parte del proyecto, porque algunas de ellas se encontraban cerradas o derrumbadas impidiendo el acceso a las mismas. Esta la razón para que en el proyecto solo se caracterizaran 8 de las 16 minas existentes.

El capítulo trata sobre la evaluación ingeniero geológica del macizo rocoso de Cien Pesos con sus principales características geológicas, hidrológicas, y tectónicas. Se realiza la descripción y levantamiento topográfico de las 8 minas analizadas; se determinan las principales propiedades físico-mecánicas de las rocas, el estudio de las características de agrietamientos, la calidad de la roca, condiciones de las discontinuidades y el estudio de las aguas subterráneas, por medio de la metodología de Bieniawski (1979) y Barton et al. (1974). La metodología de trabajo por mina se realizó por tramos ingeniero geológicos de 10 a 15 mts de longitud, según la disposición de las mismas.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MINAS ESTUDIADAS EN EL SECTOR MINERO DE CIEN PESOS.

4.1.1 Mina La Mona.

Se ubica en la cota 1340 m.s.n.m al borde de la carretera con coordenadas en X 831.271 – Y 1.097.907. Es la mina base del macizo rocoso. Las litologías más comunes son las Dacitas y Andesitas porfiríticas. Es una de las minas con mayor actividad y una de las más antiguas del sector. Su total de explotación hasta la fecha es de 707.9 mts, y su longitud frente al macizo es de 347.5 mts. (Anexo E. datos de la mina)

Figura 7. Fotografía de la boca mina la mona, base Oeste del macizo rocoso de Cien Pesos.



Fuente: autor, 2018

4.1.2 Mina La Carbonera.

Se encuentra en la base Este del macizo rocoso, cota 1350 m.s.n.m, al margen de la carretera, con coordenadas en X 831.314 – Y 1.097.916 con un total de explotación de 572 mts, y una longitud frente al macizo de 255.8 mts hasta la fecha de estudio. Las litologías más comunes son esquistos grafitosos, dacitas y andesitas porfiríticas. (Anexo F. datos de la mina)

Figura 8. Fotografía de la boca mina la carbonera, base Este del macizo rocoso de Cien Pesos.

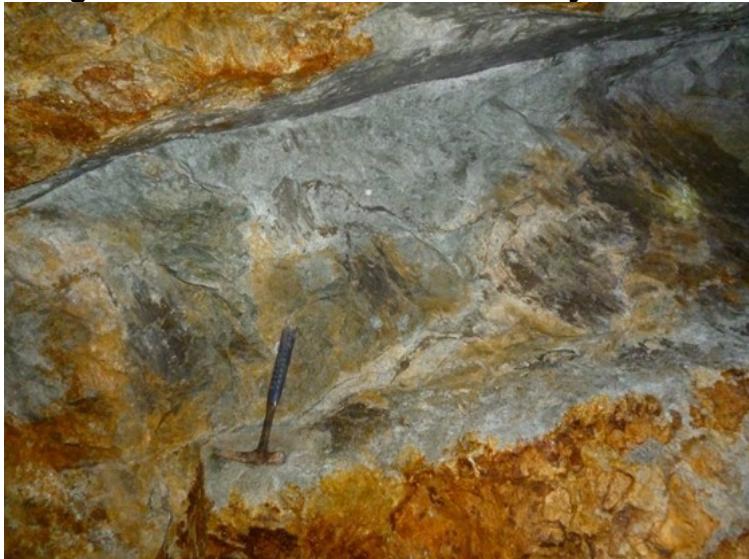


Fuente: autor, 2018

4.1.3 Mina La Golondrina.

Está ubicada en la cota 1359 m.s.n.m con coordenadas en X 831.296 – Y 1.097.941. Se encuentra en la parte media del macizo con un total de excavación de 772.66 mts y una longitud de 349 mts hasta la fecha. La litología que presenta son dacitas y andesitas porfiríticas. Sus zonas más inestables se encuentran en las áreas más profundas influenciadas por la presencia de agua. Adicionalmente la zona mineralizada está compuesta por vetas anchas (anchadura) que en algunos casos superan un metro de espesor y en donde se encuentran materiales arcillosos, altamente meteorizados. (Anexo G. datos de la mina)

Figura 9. Fotografía tomada en la mina La Golondrina, se observa en unas de sus guías las alteraciones de la roca y el diámetro de sí misma



Fuente: autor, 2018

4.1.4 Mina La Pinta.

Colinda en la parte superior con la mina La Ratonera Baja, Se ubica en la cota 1392 m.s.n.m y coordenadas planas en X: 831.191 - 1.097.966. Estas dos minas son un claro ejemplo de la distribución minera en Marmato Caldas, en donde muchas minas y sectores están intercomunicados, a pesar de que estas propiedades correspondan a diferentes propietarios. Cuenta con un total de excavación de 419.7 mts y una longitud de 178 mts hasta la fecha del estudio. (Anexo H. datos de la mina)

Figura 10. Fotografía del método de transporte del material de las minas que están en las partes altas.



Fuente: autor, 2018

4.1.5 Mina La Ratonera Baja.

Los cuerpos auríferos de esta mina se relacionan principalmente a filones mineralizados que corren a través de las grietas o fracturas de rocas caja, en el pórfito dacítico-andesítico se identifican los tipos de cuerpos rocoso de la zona de estudio, pero adicionalmente podemos identificar las zonas de mayor deformación dentro de las excavaciones, se puede observar las alteraciones que influyen en el macizo rocoso. La mina la ratonera se encuentre entre la cota 1394m.s.n.m con coordenadas planas en X: 831.189 – Y: 1.097. 963. cuenta con un total de

excavación 659 mts y una longitud en profundidad de 289 mts hasta la fecha. (Anexo I. datos de la mina)

Figura 11. Mantenimiento del socavón por el método de entibado.



Fuente: autor, 2018

4.1.6 Mina La Uno.

Ocupa un estado intermedio dentro del macizo rocoso con una cota de 1397m.s.n.m y coordenadas planas en X: 831.211-Y: 1.097.982. Un total de 834.6 mts de excavación y una longitud de 267 mts se evidenciaron al momento de la investigación. Cuenta con 3 frentes principales. Es una de las minas del sector con mayor actividad. La litología presente está dada por el pórfito dacítico-andesítico y en las zonas más profundas se evidencia el esquisto grafitoso, siendo este cuerpo metamórfico uno los problemas más difíciles en los procesos de explotación y estabilidad. (Anexo J. datos de la mina)

Figura 12. Fotografía tomada en la mina La Uno, en uno de sus frentes principales, se puede observar de color más oscuro el esquisto grafitoso y en color más claro el pórfito dacítico-andesítico.



Fuente: autor, 2018

4.1.7 Mina La Morena

Dentro del macizo rocoso de Cien Pesos, es uno de los socavones más profundos ya que cuenta con una longitud de 381 metros y una excavación de 779.5 metros hasta la fecha de su análisis. Se sitúa en el costado Noreste del macizo, en la cota 1400m.s.n.m y con coordenadas planas en X: 831.302 – Y: 1.098.074. Su distribución topográfica la hace una de las minas con mayor estabilidad. Cuanta con dos litologías dominantes del sector los Pórfidos dacítico-andesítico. (Anexo K. datos de la mina)

Fotografías tomadas de la mina La Morena, en el lado derecho se observa uno de los sectores dentro de la mina y en la parte izquierda la boca mina.



Fuente: autor, 2018

4.1.8 Mina la Torre 1.

Está ubicada en la cota más alta (1442 msnd) del macizo rocoso Cien Pesos. Coordenadas planas en X: 831.144 - Y: 1.098.059. Se evidencio un total de 226,6Mts de excavación y una longitud vertical frente al macizo de 159,63 mts en el momento de su análisis. Básicamente, cuenta con variaciones notables entre las dos litologías esquistos y pórfitos mencionados en el análisis geológico del sector. La mina solo cuenta con un frente de excavación, lo que la hace una mina de poca actividad aurífera. (Anexo L. datos de la mina)

Figura 13. Fotografía tomada en la mina la Torre 1, se nota el contacto entre los dos cuerpos rocosos, en la parte superior se encuentra descansando sobre el pórfito, el esquisto grafitoso con un rumbo de 240 y buzamiento de 75 (regla de la mano derecha).



Fuente: autor, 2018

En esta primera etapa de reconocimiento se pudieron observar las zonas activas e inactivas de las minas estudiadas, las principales vetas, las zonas estables e inestables. Además se desarrolló un modelo cartográfico en 3D para visualizar su distribución dentro del macizo rocoso de Cien Pesos. (Anexo B cartografía en modelo 3D de las minas del sector minero de Cien Pesos).

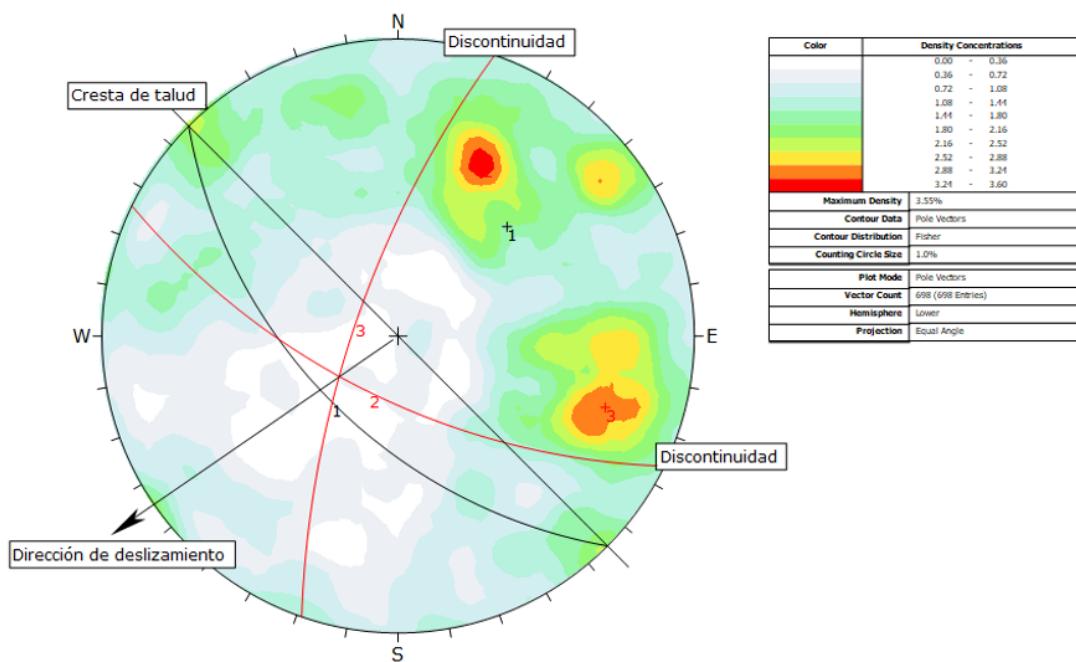
4.2 ANÁLISIS DE PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA

Para realizar análisis y visualizar información estructural estereográfico se realizó con el programa Dips.

4.2.1 Diagrama de Contornos.

En el análisis del Dips Se observar tres familias de diaclasas con tendencia N20E/NW y N63W/SW. La cual es denominada rotura por cuña esta rotura se da preferentemente en macizos rocosos en los que se da una disposición adecuada en orientación y buzamiento de las diaclasas.

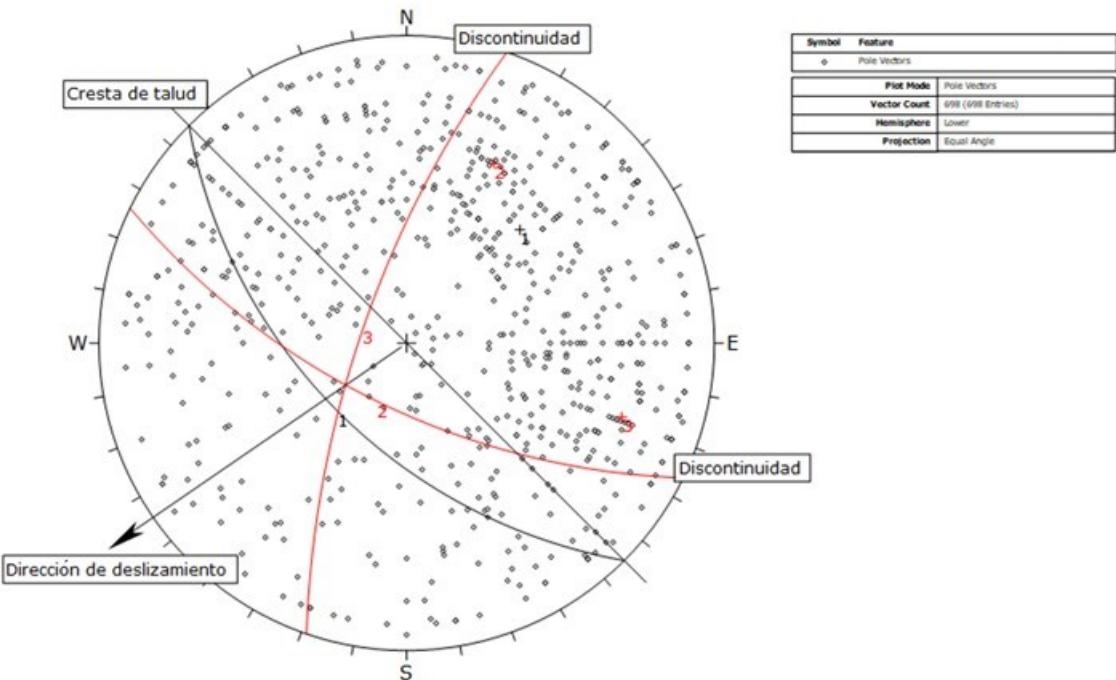
Figura 14. Diagrama de contornos, representación de las familias de diaclasas



Fuente: diagrama Dips, 2018

4.2.2 Diagrama de Polos

Figura 15. Diagrama de concentración de polos



Fuente: diagrama Dips, 2018

4.3 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.

Para obtener criterios de la resistencia de los macizos rocosos se pueden utilizar diferentes calificaciones geomecánicas (índice RMR de Bieniawski, índice Q de Barton, índice RSR de Wickham, índice RMI de Palmstron y otros), también algunos investigadores utilizan y recomiendan criterios como el de Fairhurst (para rocas no alteradas) o el de Ladanyi y Archambault (para macizos muy agrietados) (Hoek, 1994. Hoek, 1995. Hoek, 1999).

Para el caso de la resistencia del macizo rocoso del sector minero de Cien Pesos se planteó la expresión dada por Bieniawski y Barton.²⁶

4.3.1 Clasificación Geomecánico RMR

Método desarrollado por Bieniawski, (1989) que constituye un sistema de clasificación de macizos rocoso, que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros de diseño y sostenimiento de túneles.

El índice RMR (ROCK MASS RATING), que indica la calidad del macizo rocoso en cada dominio estructural a partir de los siguientes parámetros:

²⁶ BELANDRIA Norly & BONGIORNO. Francisco Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada), 2014

- 1- Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.
- 2- R.Q.D. Grado de fracturación del macizo rocoso.
- 3- Espaciado de las discontinuidades.
- 4- Condiciones de las discontinuidades, el cual consiste en considerar los siguientes parámetros:
 - Apertura de las caras de las discontinuidades.
 - Continuidad o persistencia de las discontinuidades.
 - Rugosidad.
 - Alteración de las discontinuidades.
 - Relleno de las discontinuidades.
- 5- Presencia del Agua.
- 6- Orientación de las discontinuidades.

Para obtener el Índice RMR de Bieniawski se realiza lo siguiente:

1. La suma de las 5, variables o parámetros calculados da como resultado un valor índice (RMR básico).
- 2.-El parámetro 6, se refiere a la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación.

El valor del RMR varía entre 0 a 100

Figura 16. Formato original de mapeo geomecánico RMR (1989).

Nº	MAPEO GEOMECHANICO RMR MAPEO LINEAL				Nivel:		Labor:		CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOZO RMR	
	D. Orientacion F. Falso		Tipo de discontinuidad	Densidad (m)	Espaciado entre Discontinuidad		Persistencia	Apertura	Rugosidad	
	Resistencia a la Compresion	RQD			10	15	20	30		
1	1.- > 250 Mpa 2.- 100-250 Mpa 3.- 50-100 Mpa 4.- < 25 Mpa	1.- 90-100% 2.- 75-90% 3.- 50-75% 4.- 25-50% 5.- < 25%		1.- < 2 m 2.- 2-4 m 3.- 4-8 m 4.- 8-20 m 5.- > 20 m						
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										

Fuente: CARRILLO MAUREEN et al, L. L. Clasificación geo mecánica y análisis de estabilidad. Revista Geológica de América, 6., 2002

4.3.1.1 Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.

Para llevar a cabo este procedimiento existen algunas variantes. La primera de ellas es la extracción de muestras a través de perforaciones. Otra alternativa, la cual fue adoptada para la realización de esta investigación, está relacionada con la implementación del martillo de SCHMIDT (índice de rebote). Finalmente encontramos la implementación del martillo de geólogo por medio del rebote (método de la picota).

La resistencia de la compresión simple se valoró según la siguiente tabla::

Tabla 2. Evaluación de la calidad de las rocas.

DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL (MPa)	VALORACIÓN
Extremadamente dura	>250	> 10	15
Muy dura	100 - 250	4 - 10	12
Dura	50 - 100	2 - 4	7
Moderadamente dura	25 - 50	1 - 2	4
Blanda	5 -25		2
Muy blanda	1 - 5 <1	< 1	1 0

Fuente: autor, 2018

Al momento de evaluar la calidad del macizo rocoso, la norma RMR Bieniawski (1979), (RMR- ROCK MASS RATING)²⁷, adquiere un valor muy importante, en razón a que sus criterios ingeniero-geológicos son óptimos y fáciles de interpretar. La resistencia de la roca o resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa fue el primer parámetro de la investigación. Para ello se implementó el índice de rebote (MARTILLO DE SCHMITD) o esclerómetro. Su uso es muy frecuente ya que su manejo no es completo y puede aplicarse sobre roca matriz y sobre las discontinuidades (resistencia de los bordes). El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada. La medida de rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico, (figura 17) a Miller (1965) que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto del plano de ensayo.²⁸.

²⁷ BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

²⁸ LOZANO, A. Martillo Schmidt (Esclerómetro). Geoengineering services & Consulting E.I.R., 2011

Figura 17. A la izquierda grafico para corregir el impacto del esclerómetro según su ángulo, a la derecha modelo de esclerómetro utilizado para la investigación.



Fuente: autor, 2018

En esta oportunidad se utilizó un martillo tipo HT225, que provee una energía de impacto de 2.207 J. La energía cinética de rebote inicial viene dada como una medida para determinar la dureza de la roca; la presión sobre la superficie o la resistencia a la presión (kg/cm^2 o su conversión a N/mm^2).

La calidad de la roca se determina principalmente por su resistencia a la presión, ya que es un valor orientado a comprobar su capacidad de carga y la resistencia frente a la deformación ²⁹ En nuestro proyecto se generaron alrededor de 1.968 impactos con el fin conocer la estabilidad del macizo rocoso. Cada discontinuidad o plano consto de 4 impactos para un total general de 492 datos obtenidos. (Tabla 3).

²⁹ LOZANO, A. Martillo Schmidt (Esclerometro). Geoengineering services & Consulting E.I.R., 2011

Tabla 3. De valores promedio de la resistencia de la roca, macizo rocoso de Cien Pesos, obtenidos mediante la utilización de esclerómetro (Metodología de Schmidt).

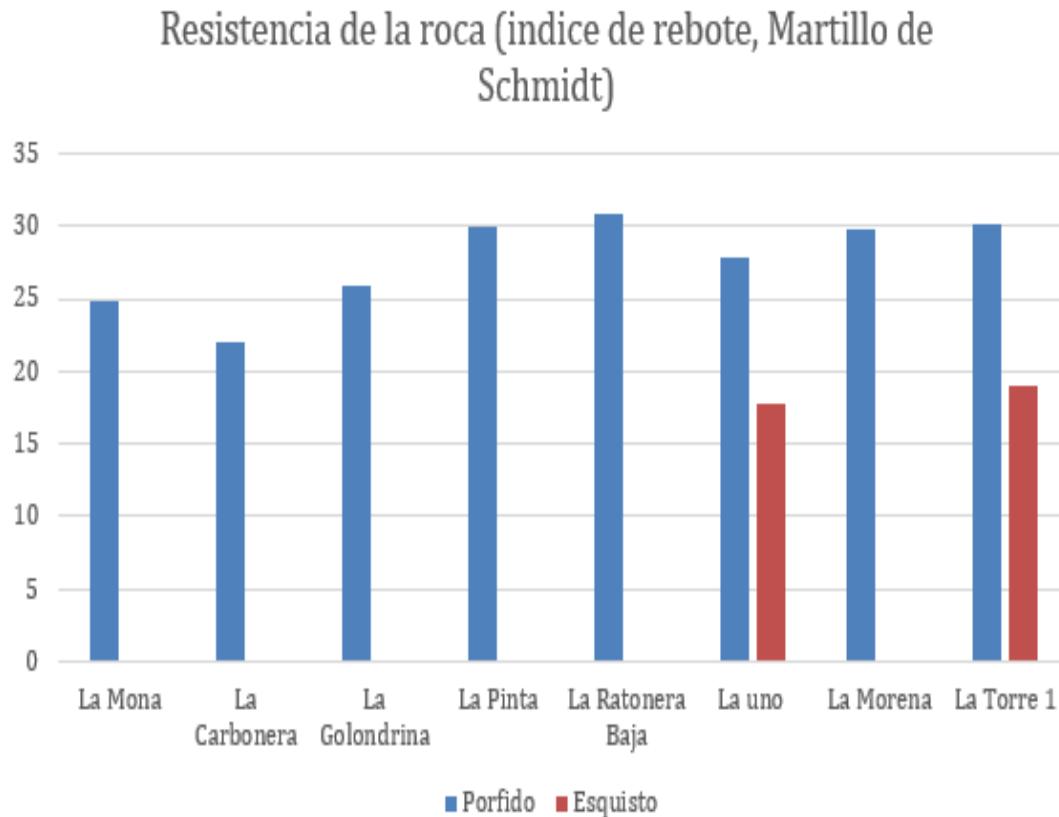
MARTILLO SCHMIDT (ÍNDICE DE REBOTE) PROMEDIO POR MINA				
MINA	TIPO DE ROCA	NUMERO DE IMPACTOS	PROMEDIO (Mpa)	RESISTENCIA DE LA ROCA (RMR)
La Torre Uno	Esquisto	80	18,99	Blanda
	Pórfito	48	30,19	Moderadamente dura
La Carbonera	Pórfito	148	21,97	Blanda
La Golondrina	Pórfito	280	25,88	Moderadamente dura
La Pinta	Pórfito	216	29,87	Moderadamente dura
La Mona	Pórfito	252	24,78	Blanda
La Morena	Pórfito	420	29,78	Moderadamente dura
La Ratonera Baja	Pórfito	132	30,86	Moderadamente dura
La Uno	Esquisto	12	17,69	Blanda
	Pórfito	380	27,91	Moderadamente dura
Promedio esquisto		92	18,34	Blanda
Promedio Pórfito		1876	27,65	Moderadamente dura
promedio macizo		1968	27,79	Moderadamente dura

Fuente: autor, 2018

El índice de rebote o la implementación de la metodología de Schmidt por medio del esclerómetro, arroja datos geo estadísticos más concretos sobre la calidad de las rocas halladas en el área analizada (Tabla 2). La interpretación se realizó por cada una de las excavaciones que se observa en el diagrama 1, en donde se registran los ábacos de cada una de las minas para la valoración RMR, con un rango que va desde 5 Mpa como mínimo a 50 Mpa como máximo. En la gráfica numero 1 al lado izquierdo del grafico 2 se observan las minas con cotas más bajas que arrojan datos del pórfito por debajo de los 25 Mpa. Estas son las minas La Mona y La Carbonera. Según Bieniawski, dentro de su clasificación geomecánica (RMR) corresponde a rocas con índices bajos o BLANDOS. La tendencia de la resistencia tiende a ser positiva hacia la derecha. En este rango encontramos las minas La Golondrina, La Pinta, La Ratonera Baja, La Uno, La Morena y La Torre 1, que tienen cotas más altas y sus datos varian por encima de los 25 Mpa, equivalente a rocas con índices MODERADOS. El esquisto grafitoso

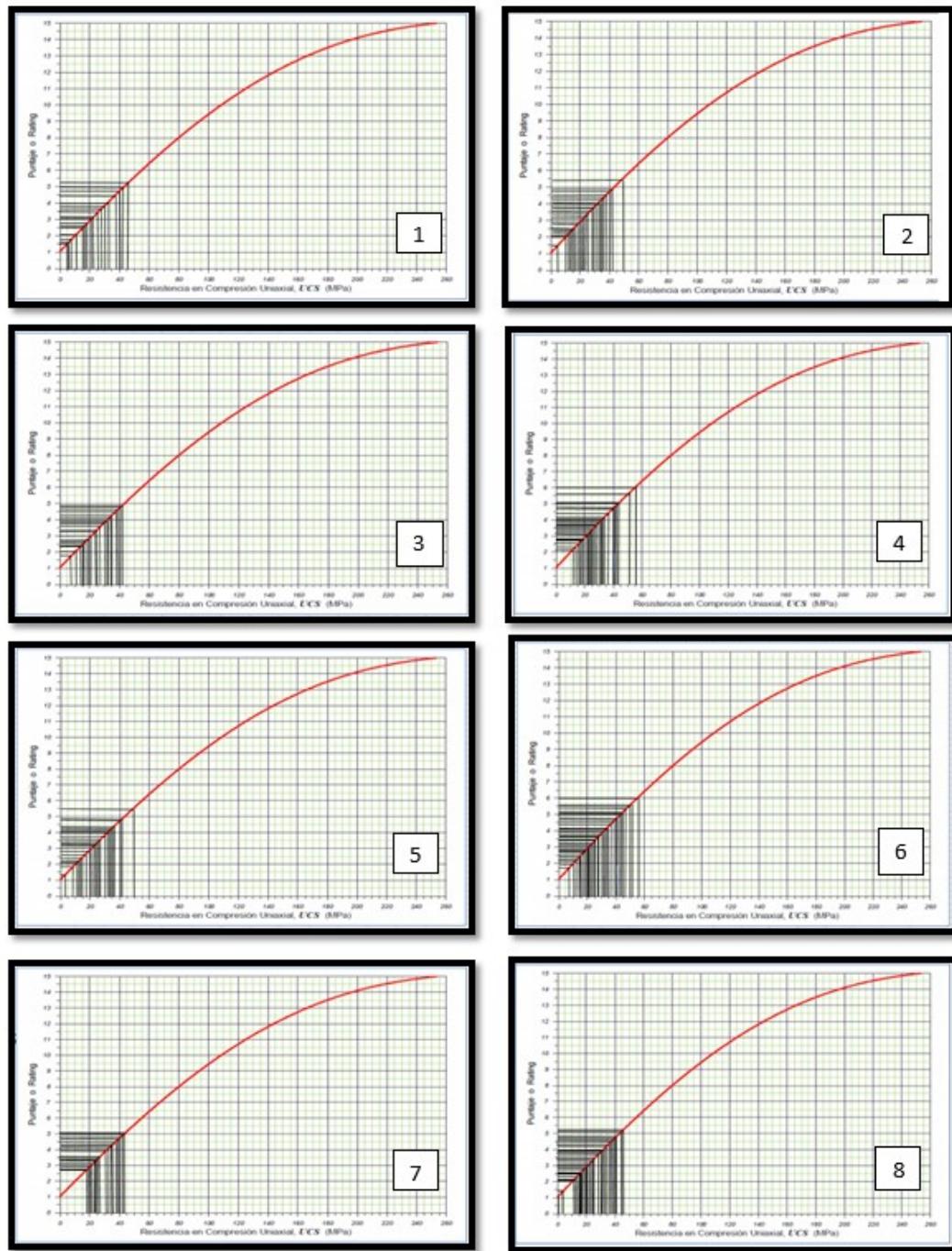
encontrado en las minas La Uno y la mina la Torre 1, debido a su calidad, arrojaron datos que están por debajo de los 20 Mpa generando así zonas de rocas dentro de las excavaciones con índices bajos o BLANDOS.

Gráfico 1. Evaluación de las resistencias de las rocas en el macizo rocoso de Cien Pesos, mostrando la variación por mina y de litología. Del lado izquierdo las minas con cotas más bajas y hacia la derecha las minas con cotas más altas.



Fuente: autor, 2018

Gráfico 2. En este diagrama se hace la valoración según el primer parámetro evaluado por la metodología RMR (Resistencia a la compresión simple). Ábaco 1 mina la Torre 1, ábaco 2 mina la Carbonera, ábaco 3 mina la Golondrina, ábaco 4 mina la Pinta, ábaco 5 mina la Mona, ábaco 6 mina la Morena, Abaco 7 mina la Ratonera Baja y ábaco 8 mina la Uno.



Fuente: autor, 2018

4.3.1.2 R.Q.D. Grado de fracturación del macizo rocoso.

La calidad de roca RQD se puede determinar por: Trozos de rocas testigos mayores de 10 cm recuperados en sondeos, la segunda opción es el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen (1m³) del macizo rocoso, implementada en esta metodología de la investigación, definido mediante el parámetro J_v, la tercera es teóricamente a partir de la densidad de las discontinuidades o frecuencia de las discontinuidades por Hudson, 1989. El índice de calidad RQD se evalúa de acuerdo con la siguiente tabla 4:

$$RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v$$

En donde:

Tabla 4. J_v= número de las discontinuidades por metro cubico.

ÍNDICE DE CALIDAD RQD (%)	CALIDAD	VALORACIÓN
0 -25	Muy mala	3
25 - 50	Mala	8
50 - 75	Regular	13
75 - 90	Buena	17
90 - 100	Excelente	20

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Evaluación de calidad RQD.

En los parámetros requeridos para la evaluación de macizos rocosos por medio del índice de calidad RQD, se realizó la evaluación de aproximadamente 162 sectores correspondientes al macizo rocoso de Cien Pesos. Donde se pudo realizar un análisis en promedio del macizo por cada una de las minas estudiadas (índice de calidad evaluado por cada uno de los sectores propuestos para la evaluación RQD). Representada en la tabla 5 Donde se observa que la valoración del índice de calidad RQD en la mayoría de las minas es REGULAR.

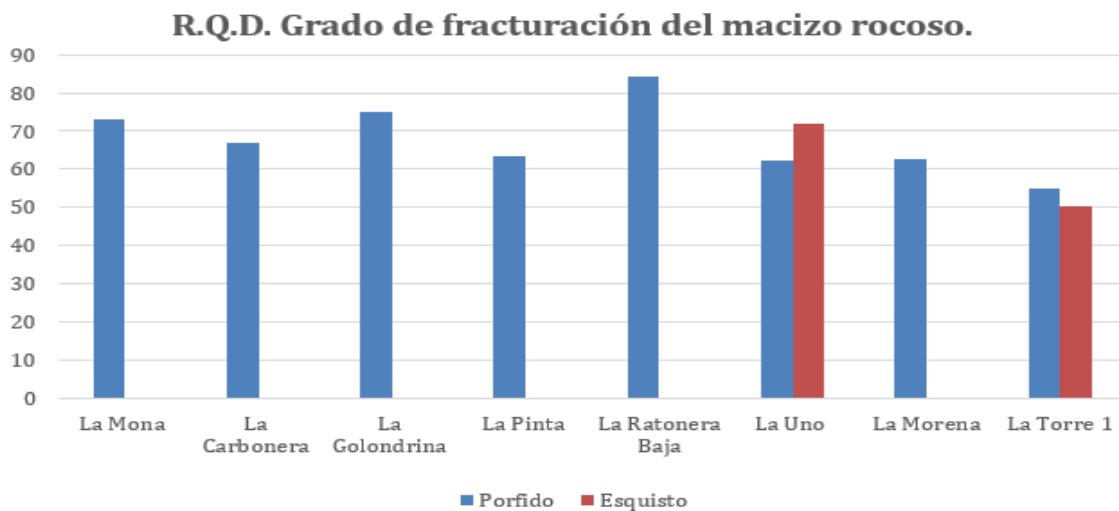
En la gráfica dos, se llevan todos los datos en promedio tomados de la tabla 5 y se puede observar que las minas con cotas más bajas cuentan con mayor porcentaje RQD que las minas con cotas más altas. Nos da a entender que la calidad de fracturación se hace más notoria en la parte alta del macizo rocoso.

Tabla 5. Tabla de valores promedio del grado de fracturación del macizo rocoso de Cien Pesos.

R.Q.D. Grado de fracturación del macizo rocoso.			
MINA	TIPO DE ROCA	RQD = 115 3,3. Jv	INDICE DE CALIDAD RQD
La Torre Uno	Esquisto	50,38	Regular
	Pórfido	54,84	Regular
La Carbonera	Pórfido	66,77	Regular
La Golondrina	Pórfido	75,05	Buena
La Pinta	Pórfido	63,44	Regular
La Mona	Pórfido	73,01	Regular
La Morena	Pórfido	62,64	Regular
La Ratonera Baja	Pórfido	84,09	Buena
La Uno	Esquisto	72,01	Regular
	Pórfido	62,09	Regular
Promedio esquisto		61,19	Regular
Promedio Pórfido		67,74	Regular
promedio macizo		66,43	Regular

Fuente: autor, 2018

Gráfico 3. Evaluación del grado de fracturación de las rocas en el macizo rocoso de Cien Pesos, mostrando la variación por mina y de litología. Del lado izquierdo las minas con cotas más bajas y hacia la derecha las minas con cotas más altas.



Fuente: autor, 2018

4.3.1.3 Espaciado de las discontinuidades.

La separación o el espaciamiento de las discontinuidades están clasificados según la tabla 6 que a continuación se observa:

Tabla 6. La separación o el espaciamiento de las discontinuidades

DESCRIPCIÓN	ESPACIADO DE LAS JUNTAS	TIPO DE MACIZO ROCOSO	VALORACIÓN
Muy separadas	> 2 m	Sólido	20
Separadas	0,6 - 2 m.	Masivo	15
Moderadamente juntas	200- 600 mm.	En bloques	10
Juntas	60 - 200 mm.	Fracturado	8
Muy juntas	< 60 mm.	Machacado	5

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Figura 18. Fotografía tomada en la mina la pinta se observa el espaciamiento de una de las caras de las diaclasas evaluadas.



Fuente: autor, 2018

El espaciado es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Este determina el tamaño de los bloques de roca intacta. Cuando menos espaciado tenga los bloques serán más pequeños y cuanto mayor sea el espaciado los boques serán más grandes.³⁰

Para determinar el espaciado aproximado del macizo rocoso de Cien Pesos se evaluaron alrededor de 537 datos (Anexo datos estadísticos por discontinuidad) distribuidos en las diferentes minas del sector. La valoración del espaciado por medio de la metodología RMR determina el tipo de macizo rocoso, el cual se observa en la tabla 7. Los tamaños de las discontinuidades dentro del macizo corresponden a BLOQUES. Dentro del grafico 4 se observa que en la mayoría de las minas de este accidente geográfico, el esparcimiento es muy homogéneo, destacándose en este sentido la mina Torre 1 que tiene la cota más alta, se advierten cambios y sus rocas son un poco más fracturadas. .

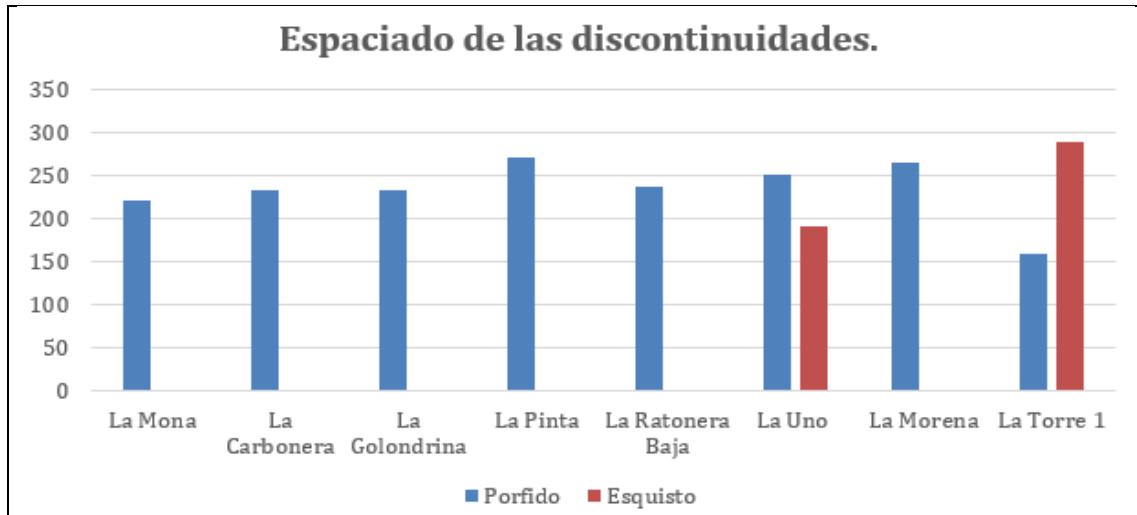
Tabla 7. Tabla de valores promedio del espaciado de las discontinuidades del macizo rocoso de Cien Pesos.

Espaciado de las discontinuidades.			
MINA	TIPO DE ROCA	ESPACIADO DE LAS JUNTAS (mm)	TIPO DE MACIZO ROCOSO
La Torre Uno	Esquisto	298,09	En bloque
	Pórfito	159,23	Fracturado
La Carbonera	Pórfito	232,37	En bloque
La Golondrina	Pórfito	232,28	En bloque
La Pinta	Pórfito	270,37	En bloque
La Mona	Pórfito	220,95	En bloque
La Morena	Pórfito	265,33	En bloque
La Ratonera Baja	Pórfito	237,57	En bloque
La Uno	Esquisto	190	Fracturado
	Pórfito	251,05	En bloque
Promedio esquisto		244,04	En bloque
Promedio Pórfito		233,54	En bloque
promedio macizo		237,72	En bloque

Fuente: autor, 2018

³⁰ BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Gráfico 4. Evaluación del espaciado de las discontinuidades de las rocas en el macizo rocoso de Cien Pesos, mostrando la variación de litología por mina. Del lado izquierdo las minas con cotas más bajas y hacia la derecha las minas con cotas más altas.



Fuente: autor, 2018

4.3.1.4 Condiciones de las discontinuidades.

La norma RMR evalúa cinco parámetros básicos de las discontinuidades, teniendo en cuenta las características principales del macizo rocoso, tales como:

Persistencia: es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad. Cuanto menor sea la persistencia la masa rocosa será más estable y cuanto mayor sea esta, será menos estable representado en la tabla 8.³¹

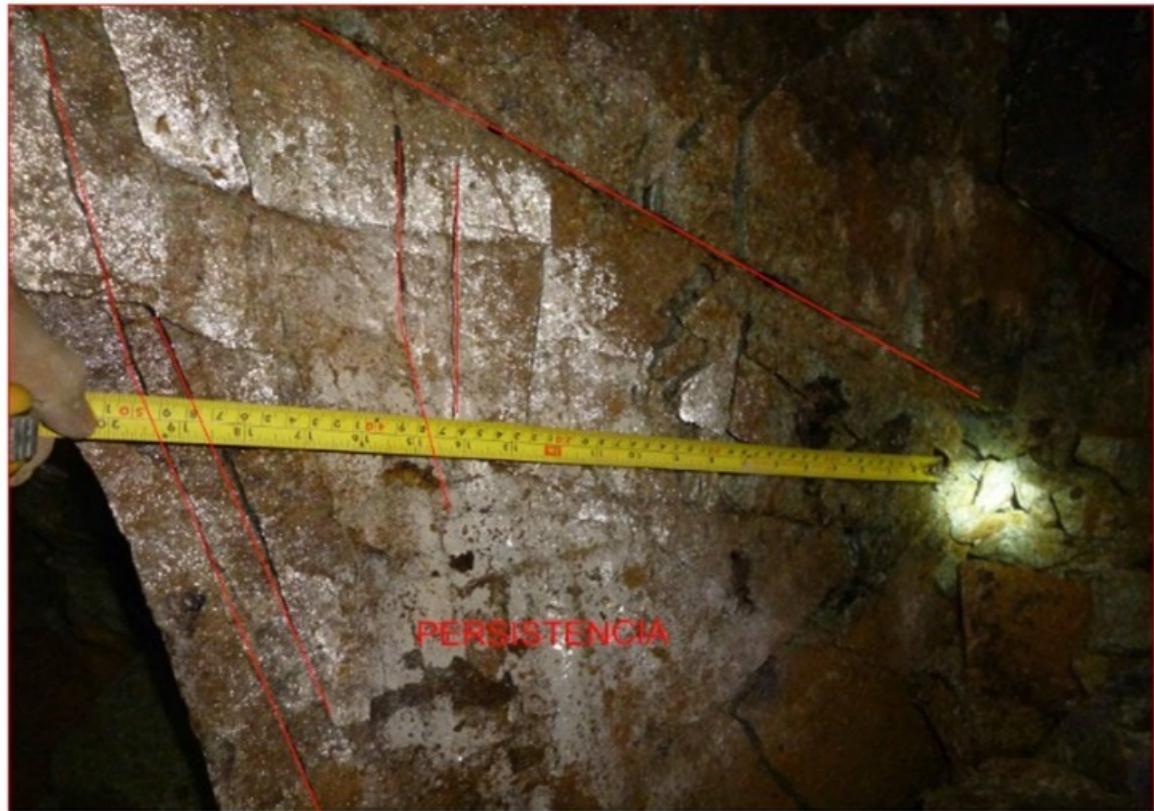
Tabla 8. Persistencia

GRADO	DESCRIPCIÓN	CONTINUIDAD	VALORACIÓN
1	Muy baja	< 1 m	6
2	baja	1 - 3 m	4
3	Media	3 - 10 m	2
4	Alta	10 - 20 m	1
5	Muy alta	> 20 m	0

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

³¹ BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Figura 19. Fotografía tomada en la mina la mona, se observa la persistencia.



Fuente: autor, 2018

Rugosidad: es la aspereza o irregularidad de la superficie de las discontinuidades. Cuanta menor rugosidad tenga una discontinuidad, la masa rocosa será menos competente y cuanto mayor sea esta, la masa rocosa será más competente tabla 9.³²

Tabla 9. Rugosidad

GRADO	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
1	Muy rugosa	6
2	Rugosa	5
3	Ligeramente rugosa	3
4	Lisa	1
5	Plana (espejo de falla)	0

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

³² BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Figura 20. Fotografías tomadas en la mina la Uno, se observa la rugosidad de las discontinuidades.



Fuente: autor, 2018

Apertura: es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de "abierto" que esta presenta. A menor apertura, las condiciones de la masa rocosa serán mejores y a mayor apertura, las condiciones serán más desfavorables tabla 10. ³³

Tabla 10. Apertura

GRADO	DESCRIPCIÓN	SEPARACIÓN DE LAS CARAS	VALORACIÓN
1	Abierta	> 5mm	0
2	Moderadamente abierta	1 - 5 mm	1
3	Cerrada	0,1 - 1 mm	4
4	Muy cerrada	< 0,1 mm	5
5	Ninguna	0	6

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

³³ Ibid 27

Figura 21. Fotografías tomadas en la mina la Ratonera Baja, se observa la apertura o aperturas de las discontinuidades.



Fuente: autor, 2018

Relleno: Son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando estos son más duros, esta es más competente tabla 11.³⁴.

Tabla 11. Relleno

GRADO	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
1	Blando > 5 mm	0
2	Blando < 5mm	2
3	Duro > 5mm.	2
4	Duro < 5 mm	4
5	Ninguno	6

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

³⁴ BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Figura 22. Fotografías tomadas en la mina la Pinta, se observa el relleno de las discontinuidades.



Fuente: autor, 2018

Alteración: la alteración se genera debido a su influencia en las propiedades mecánicas de la materia intacta, así como la potencialidad del efecto del coeficiente de fricción en la superficie de la roca tabla 12.³⁵.

Tabla 12. Alteración

GRADO	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
1	Descompuesta	0
2	Muy alterada	1
3	Moderadamente alterada	3
4	Ligeramente alterada	5
5	No alterada	6

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

³⁵ PÁEZ, I. H. Apuntes de mecánica de rocas. México: Universidad autónoma de Chihuahua, 2004

Figura 23Fotografías tomadas en la mina la Pinta, se observa la alteración de las discontinuidades



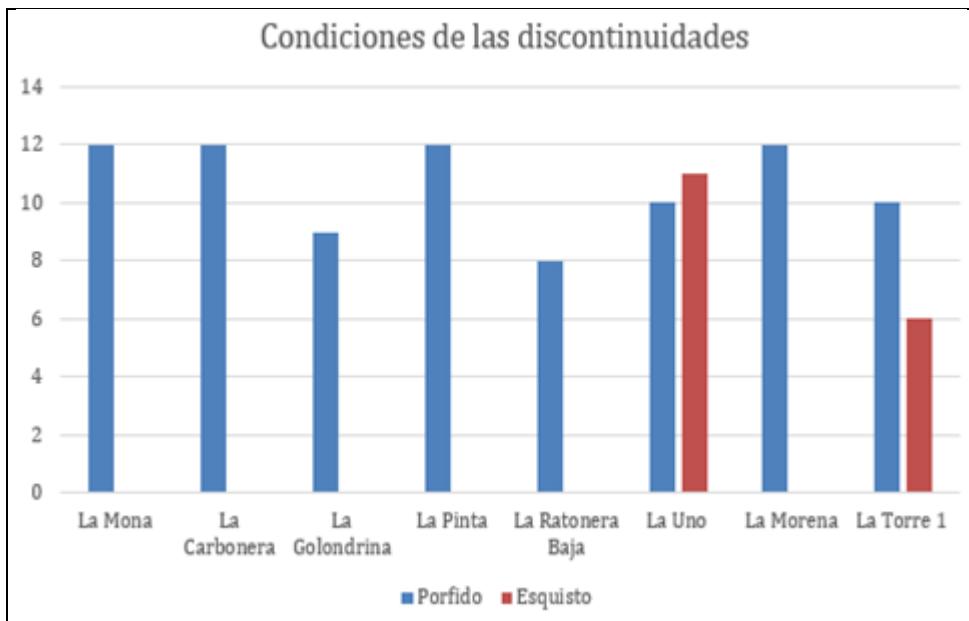
Fuente: autor, 2018

Tabla 13. Tabla de valores promedio de las condiciones de las discontinuidades del macizo rocoso de Cien Pesos.

CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES.											
MINA	TIPO DE ROCA	APERTURA	VALORACIÓN	CONTINUIDAD O PERSISTENCIA	VALORACIÓN	ALTERACIÓN	VALORACIÓN	RUGOSIDAD	VALORACIÓN	RELLENO DE LAS DISCONTINUIDADES	VALORACIÓN
La Torre 1	Esquisto	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Muy alterada	1	Muy rugoso	6	Blando > 5 mm	0
	Pórfido	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Moderadamente alterada	3	Rugoso	5	Blando < 5 mm	2
La Carbonera	Pórfido	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Moderadamente alterada	3	Rugoso	5	Duro < 5 mm	4
La Golondrina	Pórfido	Abierta	0	Baja	4	Muy alterada	1	Rugoso	5	Duro < 5 mm	4
La Pinta	Pórfido	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Moderadamente alterada	3	Rugoso	5	Duro < 5 mm	4
La Mona	Pórfido	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Moderadamente alterada	3	Rugoso	5	Duro > 5 mm	4
La Morena	Pórfido	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Moderadamente alterada	3	Rugoso	5	Duro < 5 mm	4
La Ratonera Baja	Pórfido	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Muy alterada	1	Rugoso	5	Duro < 5 mm	2
La Uno	Esquisto	Ninguna	6	Baja	4	Muy alterada	1	Muy rugoso	6	Blando > 5 mm	0
	Pórfido	Moderadamente abierta	1	Baja	4	Muy alterada	1	Rugoso	5	Duro < 5 mm	4

Fuente: autor, 2018

Gráfico 5. Se muestra la distribución de las minas frente las condiciones de las discontinuidades.



Fuente: autor, 2018

Se realiza un análisis estadístico de los datos obtenidos en campo que consiste en realizar un tratamiento probabilístico a toda la información recopilada.

En la evaluación de las condiciones de las discontinuidades se tomaron alrededor de 2.280 datos del macizo rocoso de Cien Pesos teniendo en cuenta los parámetros más importantes para las clasificaciones geomecánicas RMR Y Q que son los siguientes: la persistencia, apertura, rugosidad, alteración y relleno de las discontinuidades. En la tabla 13 se tiene los promedios de cada una de las minas del macizo, donde evalúan cada uno de los parámetros mencionados anteriormente (Anexo C tablas de datos de mapeo geomecánica por mina). En promedio el macizo rocoso cuenta con una apertura predominante de moderadamente abierta, una persistencia baja que va desde 1-3m, una alteración de moderada a alta. Su rugosidad es alta lo cual indica que es una roca competente y el estudio del relleno de las discontinuidades en su promedio dentro del macizo da índices de roca competente que corrobora los datos de la rugosidad.

4.3.1.5 Presencia del Agua.

En un macizo rocoso, el agua tiene gran influencia sobre su comportamiento. El agua se transporta por las discontinuidades, a la vez que va lavando el relleno y suavizando las paredes de la discontinuidad. Tabla 14.

Tabla 14. Presencial del agua por el caudal

CAUDAL POR 10 M DE TÚNEL	RELACIÓN PRESIÓN AGUA - TENSIÓN PPAL MAYOR	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Nulo	0	Seco	15
< 10 litros/min	< 0,1	Ligeramente húmedo	10
10-25 litros/min	0,1 - 0,2	Húmedo	7
25-125 litros/min	0,2 - 0,5	Goteando	4
>125 litros/min	> 0,5	Fluyendo	0

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 15. Clasificación del agua en cada una de las minas evaluado por sectores.

MINA // SECTOR	Presencia de agua por sectores																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
La Torre 1	10	10	15	4	0	15	4	15	15	15	15	10																				
La Morena	15	10	15	10	10	10	15	15	10	10	10	10	10	10	10	15	10	10	10	10	10	10	15	15	10	15	7	10	10			
La Uno	10	10	10	15	15	10	10	10	10	7	10	4	10	10	10	10	7	7	10	7	7	4	10	7	10	10	10	10	10	7	15	
La Ratonera Baja	10	7	10	10	10	10	0	4	7	7																						
La Pinta	10	10	15	10	10	10	15	15	15	15	15	10	15	10																		
La Golondrina	15	10	15	10	10	10	10	7	7	7	10	10	15	15	15	15	15	10	10	7	10	7										
La Carbonera	15	10	10	10	15	10	7	10	7	10	10	10	10	10	10	10	7	7	10	10	10	10	10	7								
La Mona	10	10	15	10	7	7	10	15	15	15	15	15	10	10	7	7	0	10	10													

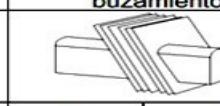
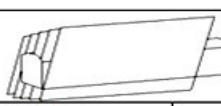
Fuente: autor, 2018

La disposición del macizo rocoso frente al agua presenta tendencias de ligeramente Húmedo a Seco, se observa que hay sectores con flujos de agua mayores debido a la presencia de la quebrada el Pantano dentro de los socavones.

4.3.2 Orientación de las discontinuidades.

Para la valoración de este parámetro se debe clasificar la roca de acuerdo con el rumbo y buzamiento con respecto a la obra civil que se va a ejecutar, esta clasificación se especifica a continuación: Tabla 15.

Tabla 16. Orientación de las discontinuidades

Rumbo perpendicular al eje de la excavacion				Rumbo paralelo al eje de la excavacion				Buzamiento 0°-20° independiente del rumbo	
Direccion con el buzamiento		Direccion contra el buzamiento		Direccion con el buzamiento		Direccion contra el buzamiento			
									
Bz	Bz	Bz	Bz	Bz	Bz	Bz	Bz		
45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°				
Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable	Regular			Desfavorable	
0	-2	-5	-10	-12	-5			-10	

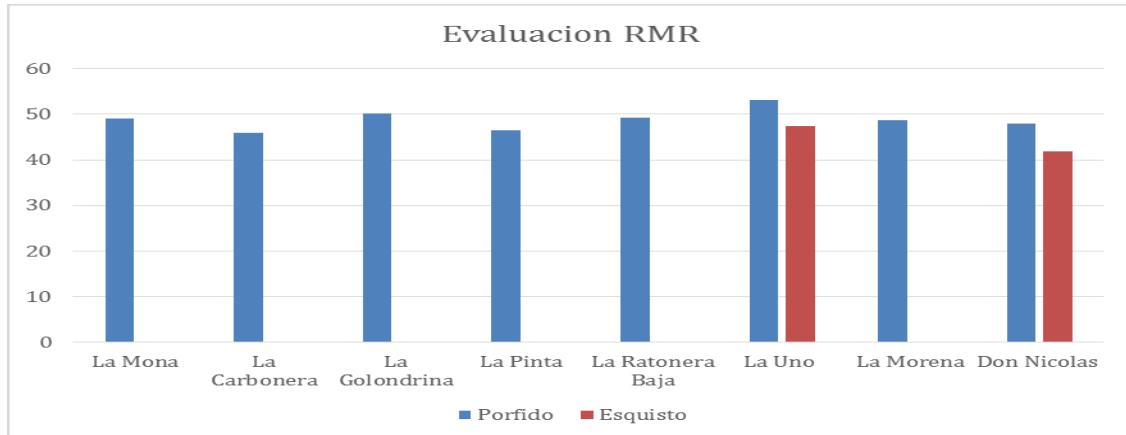
Fuente: autor, 2018

Tabla 17. Tabla de valores promedio de la evaluación RMR del macizo rocoso de Cien Pesos

PROMEDIO DE EVALUACIÓN RMR															
MINA		Resistencia de la Roca		RQD (%)		Espaciado						Orientación			
MINA	TIPO DE ROCA	Índice de rebote (Mpa)	Valoración	RQD = 115 3,3,Jv	Valoración	Descripción	Valoración	Condiciones de las discontinuidades	Aguas subterráneas	RMR Básico	Efecto de las orientaciones de las fracturas	Ajuste	RMR	Clase	Clasificación
La Torre Uno	Esquisto	18,99	2	50,38	13	298,0 9	10	12	10	47	Medio	-5	42	III	MEDIA
	Pórfido	30,19	4	54,84	13	159,2 3	8	15	10	50	Medio	-5	45	III	MEDIA
La Carbonera	Pórfido	21,97	2	66,77	13	232,3 7	10	16	10	51	Medio	-5	46	III	MEDIA
La Golondrina	Pórfido	25,88	4	75,05	17	232,2 8	10	14	10	55	Muy favorable	0	55	III	MEDIA
La Pinta	Pórfido	29,87	4	63,44	13	270,3 7	10	17	10	54	Muy favorable	0	54	III	MEDIA
La Mona	Pórfido	24,78	2	73,01	13	220,9 5	10	14	10	49	Muy favorable	0	49	III	MEDIA
La Morena	Pórfido	29,78	4	62,64	13	265,3 3	10	16	10	53	Medio	-5	48	III	MEDIA
La Ratonera Baja	Pórfido	30,86	4	84,09	17	237,5 7	10	15	9	55	Medio	-5	50	III	MEDIA
La Uno	Esquisto	17,69	2	72,01	13	190	8	17	10	50	Muy favorable	0	50	III	MEDIA
	Pórfido	27,91	4	62,09	13	251,0 5	10	15	10	52	Muy favorable	0	52	III	MEDIA

Fuente: autor, 2018

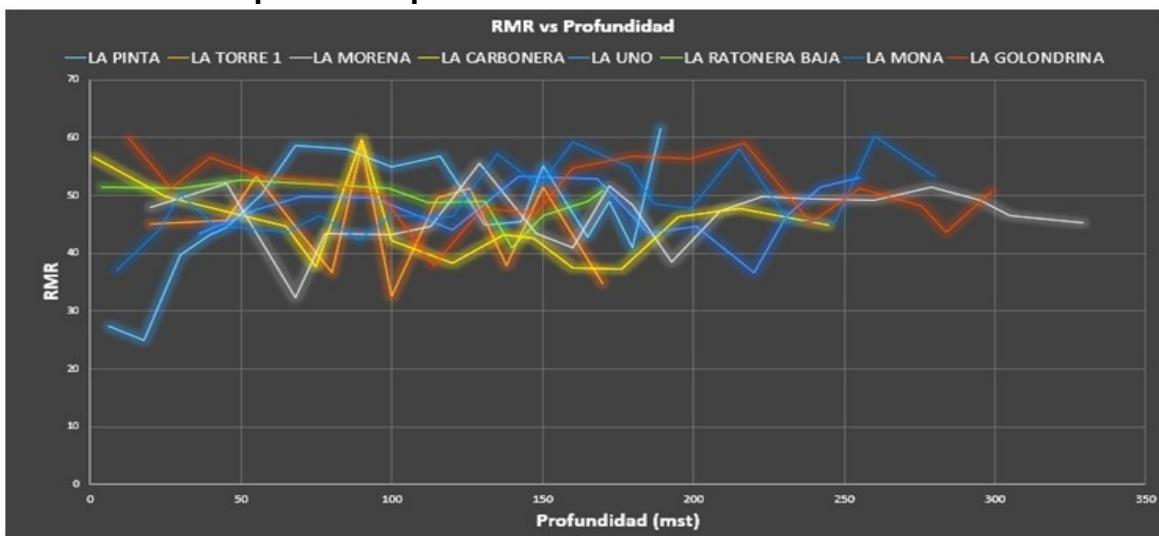
Gráfico 6. Se muestra la distribución de las minas frente la norma RMR



Fuente: autor, 2018

El Promedio de evaluación del macizo rocoso con respecto a la norma RMR indicó que tiene un comportamiento MEDIO de clase III con efecto de las orientaciones de las discontinuidades de medio a muy favorable que muestra que la orientación de las minas frente a la excavación es buena.

Gráfico 7. Se observa la tendencia de cada una de las minas evaluadas por sectores con respecto a la profundidad.



Fuente: autor, 2018

Al analizar los resultados llegamos a la conclusión que los sectores que se encuentran altamente agrietados se comportan de manera similar a los afectados por afluencia de aguas; en las tablas de resultados anexas de cada mina se observa los sectores que cumplen con estas características, es también de anotar que la alteración de la roca es más notoria en zonas húmedas que en zonas secas. Los resultados también muestran que la calidad del macizo rocoso varían

considerablemente, donde algunas minas generan tendencias de estabilidad RMR más altas en los sectores más profundos, claro que esto depende también de la actividad minera y la forma de excavación (Grafico 8).

4.3.3 Clasificación geomecánica sistema q

Desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974 a partir del estudio de un gran número de túneles, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos del mismo y diseñar sistemas de sostenimiento para túneles y cavernas subterráneas. El índice Q está basado en una evaluación numérica de seis parámetros dados por la siguiente formula

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

Dónde:

J_n = Índice de diaclasado que indica el grado de fracturación del macizo rocoso.

J_r = Índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.

J_a = Índice que indica la alteración de las discontinuidades.

J_w = Coeficiente reductor por la presencia del agua.

SFR (stress reduction factor) = coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Las tres variables de la formula representan:

(RQD / J_n): representa el tamaño de los bloques.

(J_r / J_a): representa la resistencia al corte entre los bloques.

(J_w / SRF): representa el estado tensional del macizo rocoso.

El rango de variación de los parámetros en la siguiente:

Tabla 18. R.Q.D Índice de calidad de la roca.

TIPO DE ROCA	VALOR DE Q
Excepcionalmente mala.	0,001 - 0,01
Extremadamente mala.	0,01 - 0,1
Muy mala.	0,1 - 1
Mala.	1 - 4
Media.	4 - 10
Buena.	10 - 40
Muy buena.	40 - 100
Extremadamente Buena.	100 - 400
Excepcionalmente Buena.	400 - 1000

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 19. Calidad el macizo rocoso

DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO	R Q D	OBSERVACIONES.
Muy pobre	0-25	Para R.Q.D < 10 se puede tomar R.Q.D.= 10 en la ecuación de Q.
Pobre	25-50	
Medio	50-75	
Bueno	75-90	
Muy Bueno	90-100	

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 20. Jn Índice de diaclasado que indica el grado de fracturación.

DESCRIPCIÓN	Jn
Roca masiva	0.5-1
Una familia de diaclasas.	2
Una familia de diaclasas y algunas Diaclasas ocasionales.	3
Dos familias de diaclasas.	4
Dos familias de diaclasas y algunas Diaclasas ocasionales	6
Tres Familias.	9
Tres familias de diaclasas y algunas Diaclasas ocasionales.	12
Cuatro o más familias de Diaclasas, roca muy fracturada.	15
Roca triturada terrosa.	20
<i>En boquillas, se utiliza 2 Jun y en Túneles 3 Jun</i>	

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 21. Tamaño de bloque (R.Q.D./Jn)

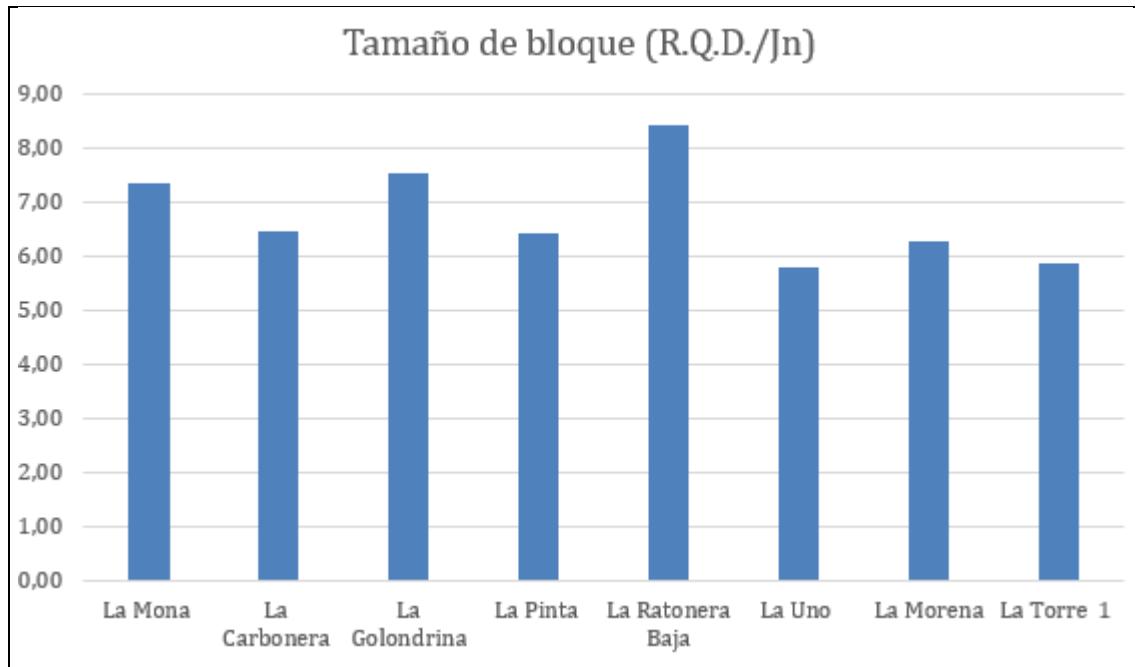
Tamaño de bloque (R.Q.D./Jn)			
MINA	RQD	Jn	R.Q.D./Jn
La Torre Uno	53	9	5,89
La Morena	62,83	10	6,28
La Uno	63,83	11	5,80
La Ratonera Baja	84,1	10	8,41
La Pinta	64,12	10	6,41
La Golondrina	75,31	10	7,53
La Carbonera	67,43	10,43	6,47
La Mona	73,65	10	7,37

Fuente: autor, 2018

La metodología de Barton, (En la que interviene otros parámetros) el tamaño del bloque (Jn /RQD) es el más influyente en los resultados obtenidos. R.Q.D. da

una valoración con un rango entre 53 a 75 lo que indica que la calidad del macizo rocoso es Media y Jn está en un rango de 9 a 10, que hay tres familias de diaclasas.

Gráfico 8. Valoración por mina.



Fuente: autor, 2018

Tabla 22. Jr. Índice de que contempla la rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades.

❖ Contacto entre las 2 caras de las diaclasas con poco desplazamiento lateral de menos de 10 cm.	Jr
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Juntas discontinuas. ▪ Juntas Rugosa o irregular ondulada. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Suave ondulada. ▪ Espejo de falla, ondulada, ▪ Rugosa o irregular, plana. ▪ Suave plana. ▪ Espejo de Falla, plano. 	4 3 2 1.5 1.5 1 0.5
❖ No existe contacto entre las 2 caras de las diaclasas cuando ambas se desplazan lateralmente.	Jr
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zona de contenido de minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de las Diaclasas. ▪ Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las 2 caras de las diaclasas. 	1 1

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 23. Ja Índice de alteración de las discontinuidades.

DESCRIPCIÓN	Ja	Ø*
Contacto entre las 2 caras de las Diaclasas		
Junta sellada, dura, sin reblandecimiento impermeable como por ejemplo cuarzo en paredes sanas.	0.75	25-30
Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25-30
Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no blandos partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla.	2	25-30
Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fricción arcillosa no reblandecible.	3	20-25
Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja		

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 24. Resistencia al corte entre los bloques (Jr/Ja)

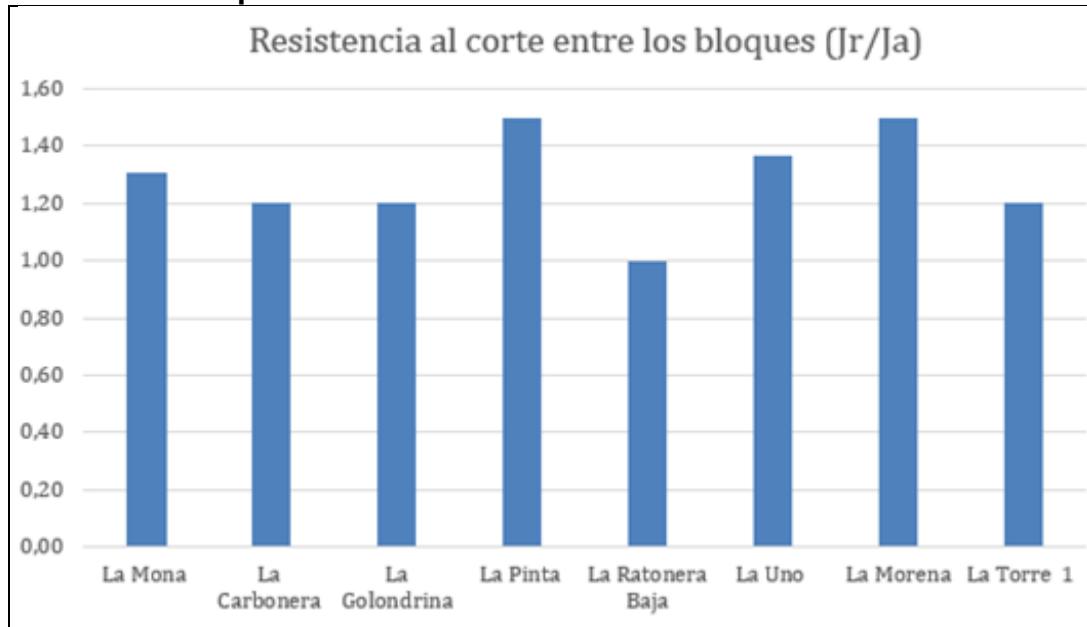
Resistencia al corte entre los bloques (Jr/Ja)			
MINA	Jr	Ja	Jr/Ja
La Torre 1	3	2,5	1,20
La Morena	3	2	1,50
La Uno	3	2,2	1,36
La Ratonera Baja	3	3	1,00
La Pinta	3	2	1,50
La Golondrina	3	2,5	1,20
La Carbonera	3	2,5	1,20
La Mona	3	2,3	1,30

Fuente: autor, 2018

La evaluación de cada sector demuestra que la rugosidad está en un rango de 3 lo que indica que las discontinuidades se encuentran juntas rugosas o irregular onduladas, y la alteración de ellas está en un rango de 2, que las caras de las discontinuidades están ligeramente alteradas y contienen minerales no blandos,

de un rango de 0.75 donde las discontinuidades de encuentran selladas, dura, sin reblandecimiento impermeable como por ejemplo cuarzo en paredes sanas.

Gráfico 9. Comportamientos de las minas



Fuente: autor, 2018

Tabla 25. Jw. Coeficiente reductor por la presencia de Agua.

DESCRIPCIÓN	Jw	Presión del agua Kg/cm ²
- Excavaciones secas o de influencia poco importante.	1	<1
- Fluencia o presión medias. Ocasional lavado de los rellenos de las Diaclasas.	0.66	1-2.5
- Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las Diaclasas.	0.33*	2.5-10
- Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas, decayendo con el tiempo.	0.1-0.2*	>10
- Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0.05-0.01*	>10
Los valores presentados con el Signo * son solo valores estimados. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar Jw		

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 26. SRF (Stress reduction factor) Coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional sobre el macizo rocoso.

1.-Zona débil que interceptan la excavación y pueden causar caídas de bloques.	SRF
A. Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor.	10
B. Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación < 50 m.).	5
C. Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente. (Profundidad de excavación > 50 m.).	2.5
D. Varias zonas de fractura en roca competente libre de arcilla, roca suelta alrededor. (Cualquier profundidad).	7.5
E. Solo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla (Profundidad de excavación < 50 m.)	5
F. Solo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla. (Profundidad > 50 m.).	2.5
G. Diaclasas abiertas sueltas, muy fracturadas. Cualquier profundidad.	5

Fuente: BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004

Tabla 27. Tensión del macizo rocoso (Jw/SRF)

Tensión del macizo rocoso (Jw/SRF)			
MINA	Jw	SRF	Jw/SRF
La Torre 1	1	5	0,20
La Morena	1	6	0,17
La Uno	1	5	0,20
La Ratonera Baja	1	5	0,20
La Pinta	1	7,5	0,13
La Golondrina	1	5	0,20
La Carbonera	1	7,5	0,13
La Mona	1	5,2	0,19

Fuente: autor, 2018

La influencia del agua es un factor importante a la hora de evaluar la resistencia del macizo, ya que es un agente activo a la meteorización de la roca.

Cada mina dio una valoración de 1 lo que indica que las Excavaciones son secas o de influencia poco importante y las condiciones tensionales con una valoración de 5 y 7.5 indica que las Diaclasas se encuentran abiertas sueltas, muy fracturadas, Varias zonas de fractura en roca competente libre de arcilla, roca suelta alrededor. (Cualquier profundidad).

Tabla 28. Valores promedios de cada una de las minas del macizo rocoso de Cien Pesos por el método Q

MINA	TIPO DE ROCA	RQD (%)	(RQD/Jn)	(Jr / Ja)	(Jw / SRF)	$Q = (RQD/Jn) \times (Jr / Ja) \times (Jw / SRF)$	Valoración	$Q' = (RQD/Jn) \times (Jr / Ja)$	$RMR = 9 \ln Q + 44$
La Torre uno	Pórfido	54,84	5,89	1,20	0,20	1,41	MALA	12,13	47,28
La Carbonera	Pórfido	66,77	6,28	1,50	0,17	1,57	MALA	9,56	45,52
La Golondrina	Pórfido	75,05	5,80	1,36	0,20	1,58	MALA	10,06	50,11
La Pinta	Pórfido	63,44	8,41	1,00	0,20	1,68	MALA	8,40	48,25
La Mona	Pórfido	73,01	6,41	1,50	0,13	1,28	MALA	11,52	49,63
La Morena	Pórfido	62,64	7,53	1,20	0,20	1,81	MALA	8,29	48,6
La Ratonera Baja	Pórfido	84,09	6,47	1,20	0,13	1,03	MALA	10,78	49,35
La Uno	Pórfido	62,09	7,37	1,30	0,19	1,85	MALA	7,21	48,47

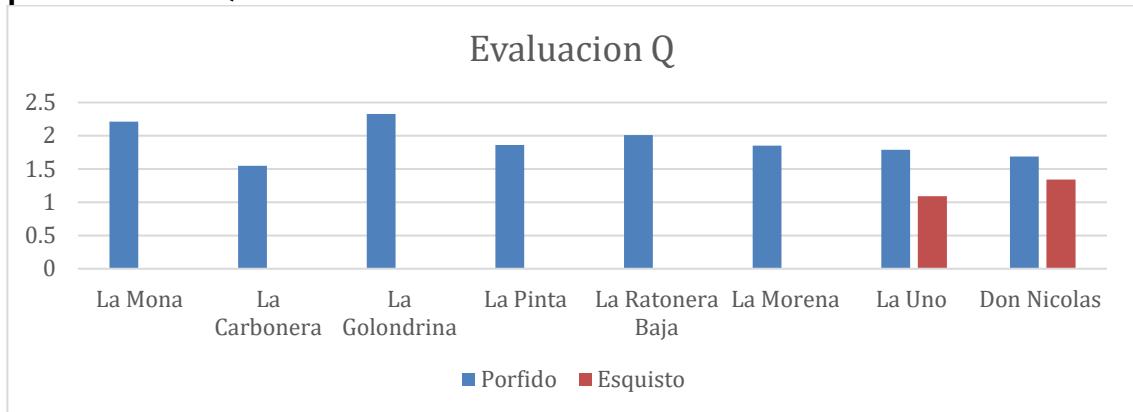
Fuente: autor, 2018

Figura 24. Fotografías representativas del sector minero de Cien Pesos, donde se muestra parámetros base para la evaluación del macizo rocoso (flujo de agua, agrietamiento, Dirección de discontinuidades entre otros).



Fuente: autor, 2018

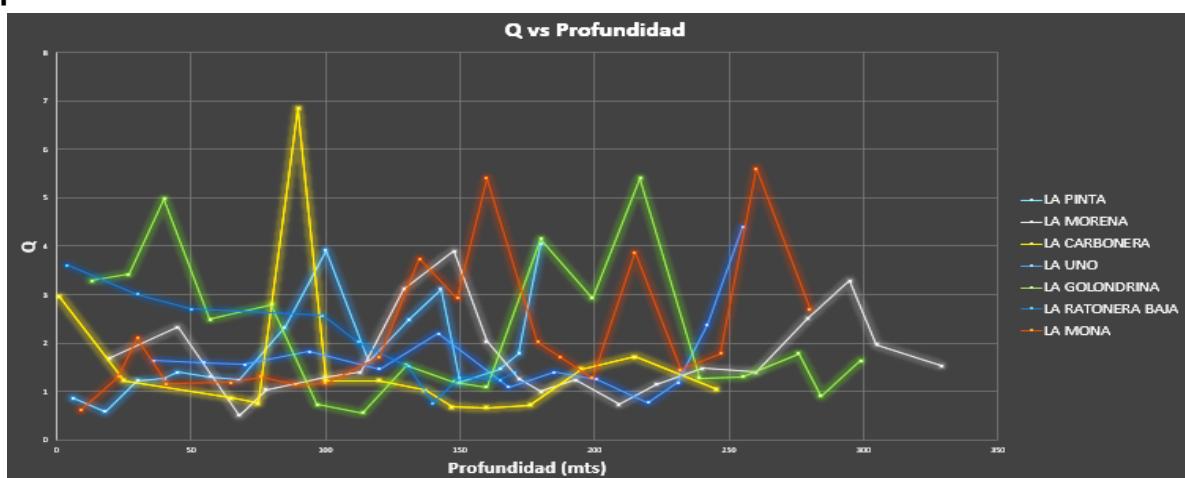
Gráfico 10. Representativa en promedio de cada una de las minas, evaluado por la norma Q del macizo rocos de Cien Pesos.



Fuente: autor, 2018

Considerar la metodología de Barton, (En la que intervienen otros parámetros) el tamaño del bloque (J_n / RQD) es el más influyente en los resultados obtenidos, estos aspectos inciden sin lugar a duda en la calidad de la roca, pero la práctica demuestra que existen parámetros que de igual forma influyen en la calidad de la roca y la estabilidad del macizo, como por ejemplo, la resistencia de la roca, el estado de las grietas, la dirección de las excavaciones respecto al agrietamiento; la influencia del agua es un factor importante a la hora de evaluar la resistencia del macizo, ya que es agente activo a la meteorización de la roca. Y muchos otros parámetros que son representativos. Bieniawski, evalúa todos estos parámetros de forma integral, lo que fundamenta los parámetros evaluados en la investigación.

Gráfico 11. Evaluación de la tendencia de Q de cada mina frente a la profundidad

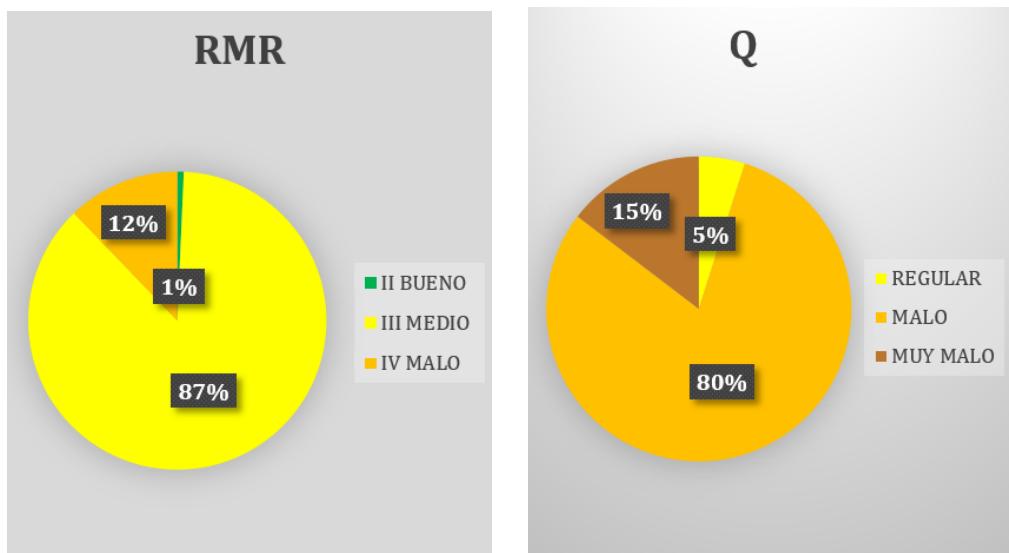


Fuente: autor, 2018

Se realizaron correlaciones lineales dispuestas por paquetes litológicos del macizo rocoso (ver en el anexo D de modelo del índice Q en 3D video) el color de cada punto representa un sector geotécnico.

Teniendo en cuenta la calidad real de este macizo, derivada de la observación visual y el análisis de cada parámetro evaluado en campo, se propone que los criterios de Bieniawski, son los más apropiados a las condiciones reales del macizo en cuestión. Aproximadamente 700 datos ingeniero geológicos evaluados, por las dos metodologías anteriormente señaladas, el 87% que corresponde a RMR (Medio) en los resultados obtenidos estiman las condiciones reales observadas en el macizo; siendo la metodología RMR la más acertada

Figura 25. Diagrama en círculo: Promedio de calificación del macizo rocoso de Cien Pesos, evaluados por las normas RMR Bieniawski (1979) (ROCK MASS RATING) y Q Barton (1974). (QUALITY INDEX)



Fuente: autor, 2018

La cuantificación de los parámetros de resistencia y deformaciones, que gobiernan el comportamiento tenso – deformacional de cualquier excavación, es uno de los principales problemas que enfrenta la mecánica de rocas. El modelo geomecánico del macizo constituye una herramienta para estimar este comportamiento sobre la base de que el mismo parte de los aspectos netamente geológicos, incorporando todos los parámetros físicos, resistentes y deformacionales del macizo rocoso involucrado. Cuantos más parámetros se logren incorporar, más representativo será el modelo geomecánico del comportamiento real del macizo. Es conveniente aclarar que el modelo geomecánico no es una propiedad del macizo rocoso como

tal, sino una representación de su estado y comportamiento en un momento dado que facilita el estudio del macizo para determinadas condiciones.³⁶

Tanto la clasificación Q como RMR son muy utilizadas en las obras de túneles por lo cual la obtención de correlaciones entre los dos métodos son especialmente útiles en el caso de túneles con objetivo exploratorios para obras subterráneas de mayor sección y complejidad

En la tabla.. Se resume los resultados obtenidos para las litologías más representativas del macizo rocoso en las obras subterráneas estudiadas, se debe anotar que las observaciones visuales del macizo en las obras de estudio con la realización de las diferentes mediciones en algunos casos, complementan los criterios para la estimación de estos modelos geomecánicos y en otras posibilitaron la confirmación de la diferenciación realizada.

Tabla 29. Tabla resumen de la evaluación RMR Y Q

Mina	roca/ sector	Resistencia de la Roca (índice de rebote)	RQD	RMR	Q
La Torre 1	Esquisto grafitoso	Blanda	Regular	III MEDIA	MALA
	Dacita-andesita Porfirítica	Moderadamente dura	Regular	III MEDIA	MALA
La Carbonera	Dacita-andesita Porfirítica	Blanda	Regular	III MEDIA	MALA
La Golondrina	Dacita-andesita Porfirítica	Moderadamente dura	Buena	III MEDIA	MALA
La Pinta	Dacita-andesita Porfirítica	Moderadamente dura	Regular	III MEDIA	MALA
La Mona	Dacita-andesita Porfirítica	Blanda	Regular	III MEDIA	MALA
La Morena	Dacita-andesita Porfirítica	Moderadamente dura	Regular	III MEDIA	MALA
La Ratonera baja	Dacita-andesita Porfirítica	Moderadamente dura	Buena	III MEDIA	MALA
La Uno	Esquisto grafitoso	Blanda	Regular	III MEDIA	MALA
	Dacita-andesita Porfirítica	Moderadamente dura	Regular	III MEDIA	MALA

Fuente: autor, 2018

³⁶ CARTAYA-PIRE, M.. Caracterización geo mecánica del macizo rocoso en obras subterráneas en el oriente del país. Chile, 2001

5 CAPITULO V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

5.1 DISCUSIONES

- Los sistemas RMR Y Q se han aplicado a centenares de proyectos bajo condiciones variadas de litologías, calidad de la roca, tamaño de excavación y profundidad.
- El índice RMR esta sistematizado por un conjunto de ábacos que son los que apoyan una clasificación original generando una visión en tiempo real de una excavación sin soporte y proponiendo parámetros de diseño en túneles.
- El índice Q puede variar entre 0,001 a 1000, rango considerablemente mayor que el correspondiente al índice RMR. Cabe señalar que el método trata con ciertos detalles los factores de rugosidad, relleno y alteración de las discontinuidades.

En la tabla se puede notar que el índice RMR Y Q tienen algunos parámetros en común a la hora de evaluar como es la resistencia de la matriz rocosa, el RQD, las condiciones de las discontinuidades, el agua

Tabla 30. Índice RMR Y Q

FACTORES	RMR (Bieniawski)	Q (Barton. Et., al)
RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA	SI (compresión)	SI
RQD	SI	SI
ESPACIAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES	SI	NO
CONDICIONES DE LAS JUNTAS	SI (global)	SI(en detalle)
AGUA	SI	SI
ORIENTACION DE LAS JUNTAS	SI	NO
NUMERO DE LAS FAMILIAS DE LAS DISCONTINUIDADES	NO	SI
NIVEL DE TENSIONES	NO	SI

Fuente: autor, 2018

5.2 CONCLUSIONES

- La valoración total para el macizo rocoso por el índice RMR es de 49,1; este valor corresponde a un macizo rocoso de categoría III, es decir, de calidad REGULAR o MEDIA, puede considerarse un tiempo medio de sostenimiento de una semana para un trecho de 5 metros (en túneles), cohesión de la roca entre 0,2 y 0,3 MPa y un ángulo de fricción de 25° a 35°. La valoración total del macizo rocoso por el índice Q es de 1,85, este valor corresponde a un macizo rocoso de descripción MALA.
- Como resultado de la investigación del macizo rocoso según su estabilidad y calidad, se obtiene que predomina el macizo de calidad REGULAR o MEDIA, aunque en diferentes sectores se observa el macizo rocoso en mal estado, condicionado a problemas estructurales debidos al deterioro generado por la acción del agua y meteorización.
- La presencia del agua en el macizo rocoso determina un papel importante en la calidad de la roca. En general la evaluación del agua por los índices RMR y Q tienen tendencias a ser ligeramente húmedos a secos con un caudal inferior a 10 lt/min. Teniendo en cuenta que hay sectores con índices de agua más altos el cual se da por la presencia de la quebrada el Pantano, el cual.
- En el análisis estereográfico se observan dos familias de diaclasas, la primera, con tendencia N20E buzando al NW, y la segunda, con una tendencia N62W buzando SW; en el diagrama de contornos las dos familias de diaclasas generan una tendencia al deslizamiento en cuña hacia el SW frente al plano del talud. El diagrama de polos indica un deslizamiento circular, debido a la dispersión de datos.
- La modelación en 3D nos indica que las minas del sector Cien Pesos comparten características como la calidad del macizo rocoso, el flujo del agua y la mineralogía.
- Bieniawski propone excavaciones, 1,5 – 3 m de avance en media sección con inicio de soporte en cada voladura, pernos sistemáticos de 4 m de longitud, con un espaciado de 1,2 – 2 m en la corona y soportes de concreto armado de 20 – 100 mm en la corona y 30 mm por los lados.

5.3 BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ E & GONZÁLEZ. (1979). Geología y Geoquímica del Cuadrángulo I-7. Inst. Nat. de Inv. Geológico-Mineras, Informe no, 1761. 347 p., 1979
- ÁLVAREZ J. ARIAS, A. Geología del Área de Marmato. Bogotá: Inst. Nat. de Inv. Geológico Mineras. Informe no. 1573. 1970
- ÁLVAREZ, A. J. Geología de la Cordillera Central y el Occidente Colombiano y Petroquímica de los Intrusivos Granitoides Meso-Cenozoicos Universidad de Chile. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias con mención en Geología, 1979
- BELANDRIA Norly & BONGIORNO. Francisco Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada), 2014
- BONGIORNO, N. B. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, escuela de geología (grupo de investigación de geología aplicada). 2004
- CARRILLO MAUREEN et al, L. L. Clasificación geo mecánica y análisis de estabilidad. Revista Geológica de América, 6., 2002
- CARTAYA-PIRE, M.. Caracterización geo mecánica del macizo rocoso en obras subterráneas en el oriente del país. Chile, 2001
- DÍAS LÓPEZ & URBANA RANGEL. Reseña histórica Marmato Caldas. Bogotá: Repùblica de Colombia, 1989
- DÍAS, A. J. Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato Caldas. . (En línea) 2013. (Consultado el 17 de enero de 2018), de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/730>
- GÓMEZ Y MAYA. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Bogotá: Boletín Geológico, Ingeominas V.35,pp.4357. 1995
- GONZALES & CALLE, B. C. Geología y geomecánica de la plancha 186 Rio sucio. Bogotá: Instituto Colombiano de Minería Ingeominas, 1982
- GONZÁLEZ, I. H. Geología del Cuadrángulo 3-8, Sonsón. Inst, Nat. de investigación Geológicas Mineras Inf. no. 1704. 1976

- JIMÉNEZ, A. D. Análisis histórico de la explotación minera en Marmato Caldas y su incidencia en la violación de los derechos humanos. Bogotá D.C: Universidad Pedagógica Nacional. 2016
- KLICHE, C. A. Rock Slope Stability. SME. 1999
- LOZANO, A. Martillo Schmidt (Esclerometro). Geoengineering services & Consulting E.I.R., 2011
- MORA. Los blancos en la sociedad colonial venezolana: Representaciones sociales e ideología. (En línea) 2011. (Consultado el 17 de enero de 2018) http://scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1011-22512011000200008
- PÁEZ, I. H. Apuntes de mecánica de rocas. México: Universidad autónoma de Chihuahua, 2004
- PARDO TRUJILLO Y MORENO -SÁNCHEZ. Stratigraphical and sedimentological constrains on western Colombia: implications on the evolution of the Caribbean Plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. F. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: hydrocarbon habitats, basin. Manizales: memoir 79, pp. 891-924, 2003
- RESTREPO J. et al, J. Precisiones geocronológicas sobre el Occidente Colombiano.: Simposio sobre Magmatismo Andino y su marco tectónico. pp. 1-22, 1991
- RODRÍGUEZ, I. G. (2014). Mini curso de geomecánica. Mapeo geomecánico para túneles y/o obras subterráneas. Perú, 1991
- TOUSSAINT AND RESTREPO. (1989). Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. V Congreso Colombiano de Geología, pp. 127-147, 1989

6 ANEXOS

Anexo A. Modelo geológico

Este es un video en mp4

Anexo B. Modelo cartográfico

Este archivo se encuentra en formato de mp4

Anexo C. Modelo RMR

Este archivo se encuentra en formato de mp4

Anexo D. Modelo Q

Este archivo se encuentra en formato de mp4

Anexo E. Mina de la Mona

Los datos generales en una tabla en excel

Anexo F. Mina la Carbonera

Los datos generales en una tabla en excel

Anexo G. Mina la Golondrina

Los datos generales en una tabla en excel

Anexo H. Mina la Pinta

Los datos generales en una tabla en excel

Anexo I. Mina La Ratonera Baja

Los datos generales en una tabla en excel

Anexo J. Mina La Uno

Los datos generales en una tabla en excel

Anexo K. Mina la Morena

Los datos generales en una tabla en excel

Anexo L. Mina La torre Uno

Los datos generales en una tabla en excel