

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOMECÁNICA DE LA MINA SAN JOAQUÍN,
PARA EL DISEÑO DE EXPLOTACIÓN POR EL MÉTODO DE CÁMARAS Y PILARES.**

CARBONES SAN FERNANDO S.A.S
CONCESIÓN 11338

MARIA CAMILA CAÑAS GAVIRIA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Geóloga

DIRECTORES

MARÍA ISABEL MARÍN CERÓN, PhD
JAIME ALBERTO PIRAGAUTA AGUILAR

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
GEOLOGÍA
MEDELLIN
2018

TABLA DE CONTENIDO

ABSTRAC.....	1
1.INTRODUCCIÓN.....	2
2. GEOLOGÍA REGIONAL.....	3
3. METODOLOGÍA.....	6
4. RESULTADOS.....	9
4.1 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA.....	9
4.1.1 LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO.....	9
4.1.2 LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO.....	12
5. MODELAMIENTO 3D -GEOMODELER.....	13
6.CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	14
6.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL MANTO 1.....	15
6.1.1 PLANOS DE FALLA MANTO 1.....	16
6.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL MANTO 2.....	17
6.2.1 PLANOS DE FALLA MANTO 2.....	19
6.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL MANTO 3.....	20
7.0 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA.....	23
7.1 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MANTO 1, 2 Y 3.....	25
8.0 DISEÑO DE EXPLOTACIÓN POR CÁMARAS Y PILARES.....	28
8.1 DISEÑO DE EXPLOTACIÓN DE CÁMARAS Y PILARES PARA MANTO 1, 2 Y 3.....	31
9.0 DISCUSIÓN.....	34
10.0 CONCLUSIONES.....	36
11.0 REFERENCIAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

Figura 2. Mapa Geológico de la zona de estudio.

Figura 3. Mapa Geológico y topografía en 3D de la zona de estudio. Diagramas no a escala.

Figura 4. Esquema Metodológico para la realización del proyecto.

Figura 5. 1) Columna estratigráfica de MTO 1- MTO 2, 2) Columna estratigráfica de MTO 2- MTO 3

Figura 6. A) Estratificación cruzada, B) laminación paralela de carbón y óxidos.

Figura 7. Modelamiento geológico de los mantos de explotación de la mina San Joaquín.

Figura 8. Diagramas representativos de diaclasas en el carbón y techo inmediato de Manto 1. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de diaclasas.

Figura 9. Diaclasamiento del carbón y roca techo en Manto 1, se observan entre 2 y 3 familias de diaclasas.

Figura 10. Diagramas representativos de planos de falla en Manto 1. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de los planos de falla

Figura 11. Falla de componente normal presente en manto 1. N80W/70°, V= 60 cm

Figura 12. Diagramas representativos de diaclasas en el Carbón y techo de Manto 2. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de diaclasas

Figura 13. A) Se observa una cuña formada por la intersección de dos familias de diaclasas presentes en el carbón. B) 4 familias de diaclasas en carbón Manto 2, C y D) se observa el techo inmediato de manto 2 con la presencia de 4 familias de diaclasas.

Figura 14. Diagramas representativos de planos de falla en Manto 2. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de los planos de falla.

Figura 15. Techo inmediato de Manto 2 donde se puede observar un plano de falla relleno del mismo material de roca pero mas triturado.

Figura 16. Diagramas representativos de diaclasas en el Carbón y techo de Manto 3. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de diaclasas.

Figura 17. A) diaclasamiento en carbón Manto 3, formando cuñas, B) Carbón deformado formando una estructura en S. C) Se observan 4 familias de diaclasas. D) Se observa el piso y el carbón de manto 3, e) Se observan 3 familias de diaclasas en el techo de manto 3, F) Espesor del manto 3 (1,45) y se observa parte del techo.

Figura 18. A) se observa la interrupcion de manto 3 debido a una falla inversa, B) Falla inversa, C) Se observa el plano de falla.

Figura 19. Representación esquemática de los parámetros de las discontinuidades. Tomado de Vallejo, 2004.

Figura 20. Proceso de ensayo de compresión simple, desde la extracción del núcleo hasta el fallamiento final de la roca.

Figura 21. A) Metodología de diseño de explotación por cámaras y pilares para los 3 mantos de carbón en la Mina San Joaquín. B) Arco de presión sobre el sistema de explotación.

Figura 22. Modelamiento del diseño de explotación por cámaras y pilares.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Formulas para el diseño metodologico de explotación por camaras y pilares.

Tabla 2. Espesor y datos estructurales promedio de los mantos 1, 2 y 3.

Tabla 3. Datos promedio para cada parámetro de descripción de las discontinuidades presentes en Manto 1.

Tabla 4. Datos promedio para cada parámetro de descripción de las discontinuidades presentes en Manto 2.

Tabla 5. Datos promedio para cada parámetro de descripción de las discontinuidades presentes en Manto 3.

Tabla 6. Valores de compresión simple para los mantos 1,2 y 3 y el techo de cada uno de ellos.

Tabla 7. Dimensiones para el diseño por cámaras y pilares Manto 1.

Tabla 8. Dimensiones para el diseño por cámaras y pilares Manto 2.

Tabla 9. Dimensiones para el diseño por cámaras y pilares Manto 3.

ANEXOS

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS.

ANEXO 2. DATOS ESTRUCTURALES Y GEOLÓGICOS.

ANEXO 3. COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS.

ANEXO 4. MODELACIÓN GEOMODELER.

ANEXO 5. DATOS ESTRUCTURALES.

ANEXO 6. DATOS DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO.

ANEXO 7. ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE.

ANEXO 8. CÁLCULO DE CÁMARAS Y PILARES.

ANEXO 9. CÁLCULO DEL ANCHO DE LA CÁMARA.

ANEXO 10. DATOS PILARES BARRERA.

ANEXO 11. MODELACION CÁMARAS Y PILARES EN SKETCHUP

ANEXO 12. VIDEO MODELACIÓN.

ABSTRACT

The main objective of this project was the geological and geomechanical characterization of the San Joaquín mine, with the aim of designing a different exploitation method that leads to diminish, avoid or mitigate the subsidence phenomenon; It also has a relationship between a recovery rate and a high safety factor that allows a safe and economically feasible extraction of the mineral. The fundamental basis of the studies consists of the description and analysis of the physical and mechanical properties of the rock mass by collecting geological and geotechnical information from simple compression tests that allows to identify and characterize the resistance of the coal beds and the roof rock, obtaining as a final result the construction of a geological and geomechanical model that determines the behavior of the rock mass in front of the vertical efforts generated by mining work, since all the ideal dimensions for the design of the exploitation by means of the method rooms and pillars.

Key Words: Geological Characterization, Geomechanical Characterization, rooms and Pillars, subsidence, exploitation design.

RESUMEN

Este proyecto tuvo como principal objetivo la caracterización geológica y geomecánica de la mina San Joaquín, con el fin de diseñar un método de explotación diferente al de tajo largo con derrumbe dirigido que conlleve a disminuir, evitar o mitigar el fenómeno de subsidencia; incluyendo también la búsqueda de un equilibrio entre una alta tasa de recuperación y un alto factor de seguridad que permitan efectuar de manera segura y económicamente factible la extracción del mineral. La base fundamental de los estudios consistió en la descripción y el análisis de las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso mediante la recopilación de información geológica y geotécnica a partir de ensayos de compresión simple en los cuales se pueda identificar y caracterizar la resistencia de los mantos de carbón y de la roca encajante, obteniendo como resultado final la construcción de un modelo geológico y geomecánico que permitan determinar el comportamiento del macizo rocoso ante los esfuerzos verticales que genera una labor minera, y a partir de allí calcular las dimensiones ideales para el diseño de explotación por medio del método cámaras y pilares.

Palabras Claves: Caracterización Geológica, Caracterización Geomecánica, Cámaras y Pilares, Subsidencia, diseño de explotación.

1. INTRODUCCIÓN

La explotación subterránea de carbón conlleva a una serie de desventajas las cuales pueden incurrir negativamente en el entorno que se realiza la extracción del mineral. Estas pueden generar cambios o fenómenos derivados de los métodos de extracción que se están ejecutando; los cuales de forma directa afectan la estabilidad del terreno superficial y del macizo rocoso en general. Las condiciones geológicas, estructurales y geotécnicas del terreno también influyen directamente en la estabilidad de las labores mineras subterráneas.

Los métodos de extracción utilizados en la explotación subterránea de carbón pueden ser de dos tipos: 1) Tajo largo con derrumbe dirigido y 2) Cámaras y Pilares; estos sistemas de explotación son usados comúnmente en las minas de carbón subterráneo en Colombia, especialmente el de tajo largo con derrumbe dirigido debido a su buena selectividad y porcentaje de recuperación del mineral, lo que conlleva a una tasa de producción alta y que por ende es económicamente más rentable en : insumos, equipos, mano de obra y costos de producción. Una de las desventajas de este tipo de minería es que a medida que se extrae el carbón, los estratos suprayacentes que soportan el manto quedan en el vacío generando derrumbes, originando pérdidas de presiones y tensiones que se evidencian en agrietamientos del macizo rocoso; como consecuencia de esto el suelo de la superficie se desplaza vertical y horizontalmente generando el denominado fenómeno de subsidencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto se estructuró con el fin de diseñar la explotación subterránea de carbón por el método de cámaras y pilares en la mina San Joaquín, perteneciente a la empresa Carbones San Fernando S.A.S. Para tal diseño es indispensable la caracterización geológica y geomecánica del macizo rocoso comprendido en el área de concesión minera, esto con el propósito de explorar otros métodos de extracción que puedan disminuir o en tal caso evitar la subsidencia del terreno incluyendo también una alta tasa de recuperación del mineral.

2. GEOLOGIA REGIONAL

La Cuenca Amagá es una depresión que esta enmarcada en el flanco occidental de la Cordillera Central, al este del rio Cauca. Afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que cubren el rango temporal desde el Paleozoico hasta el Neógeno. Sobre estas rocas reposan discordantemente depósitos no consolidados recientes de tipo aluvial y coluvial. Las fallas geológicas en la cuenca Carbonífera del Suroeste antioqueño forman parte del Sistema de Fallas de Romeral, con dirección predominante norte-sur. Las más destacadas son : San Jeronimo, Romeral, Piedecuesta, Amagá, La cascajosa, Cauca- Almaguer y Sabanalarga (Cárdenas et al., 2006).

Regionalmente, la mina San Joaquín forma parte de la cuenca Carbonífera del suroeste de Antioquia (Figura 2), mas especificamente se encuentra dentro de la Formación Amagá (Cárdenas et al., 2006). También denominado por Groose (1926) como “Terciario Carbonífero de Antioquia”, subdividiéndola en tres “pisos” los cuales se diferencian por la ausencia o presencia de mantos explotables de carbón. Geológicamente (ver Figura 2), la zona de estudio pertenece a la Formación Amagá en la cual el miembro inferior se compone principalmente de conglomerados cuarzosos, sublitoarenitas con alto contenido de cuarzo, limos masivos y mantos de carbón con espesores menores a 70 cm de tendencia lenticular (Sierra et al., 2003). El miembro medio en el cual se encuentra la mina San Joaquín se caracteriza por contener mantos de carbón explotables y la falta de conglomerados (Grosse, 1926), los mantos de carbón presentan espesores variables entre 0,7 a 3,50 m, su color es negro y presenta fractura concoidea. El miembro superior es la unidad más representativa de la formación Amagá, caracterizado por la ausencia de mantos de carbón explotables, areniscas de grano fino a medio y arcillolitas grises con concreciones calcáreas (Mejía, 1984). En la figura 2, el área de concesión 11338 (poligono rojo) se encuentra limitada por dos grandes fallas regionales (Piedecuesta al este y Amagá al Oeste); las cuales forman parte del sistema de fallas Cauca-Romeral. El área de explotación se encuentra enmarcada dentro del miembro medio de la Formación Amagá, en contacto fallado con la diorita de pueblito (Jdp) al oeste y el Stok de Amagá al este (Tra), como se observa en la figura 2 y figura 3.

El área de concesión 11338 donde se encuentra ubicada la mina San Joaquín perteneciente a la empresa Carbones San Fernando S.A.S se localiza en el municipio de Amagá, vereda paso nivel (ver Figura 1).

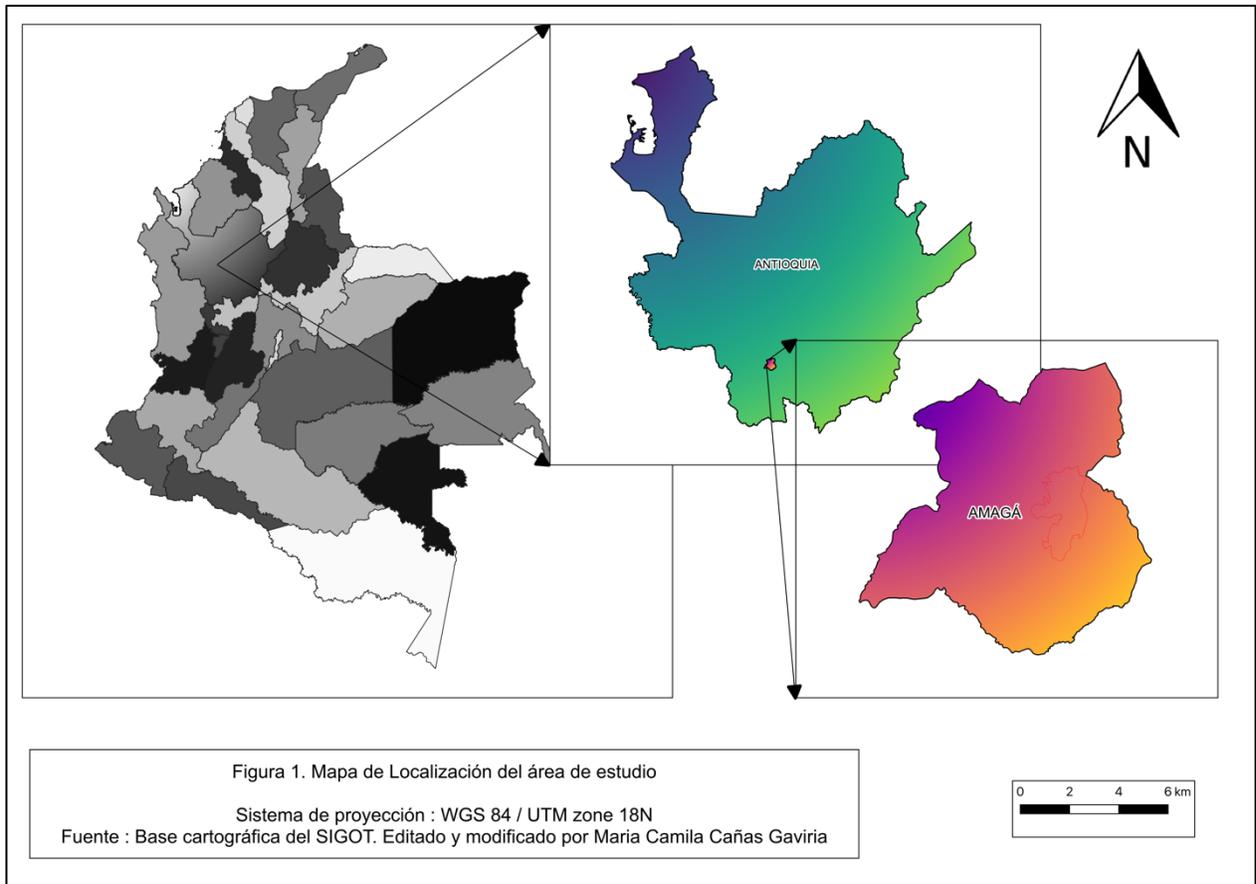


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

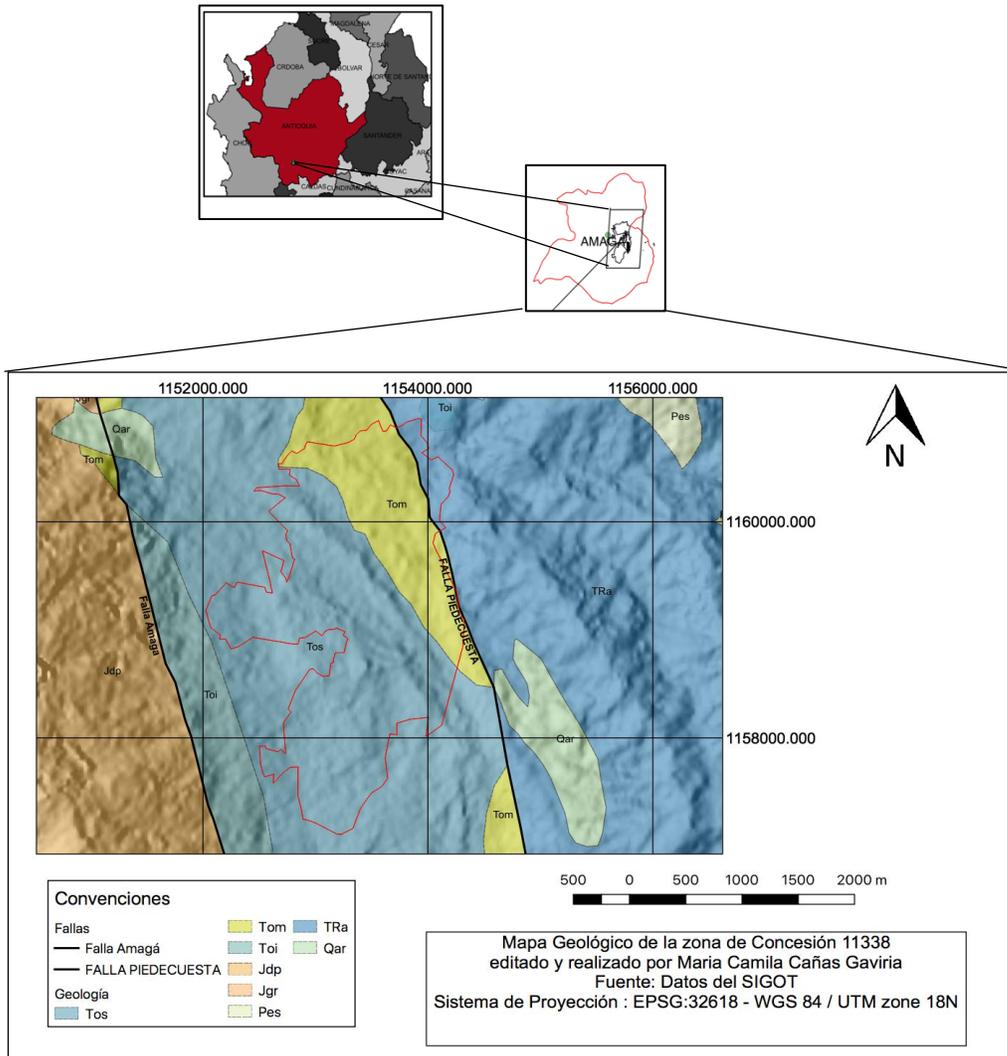


Figura 2. Mapa Geológico de la zona de estudio.

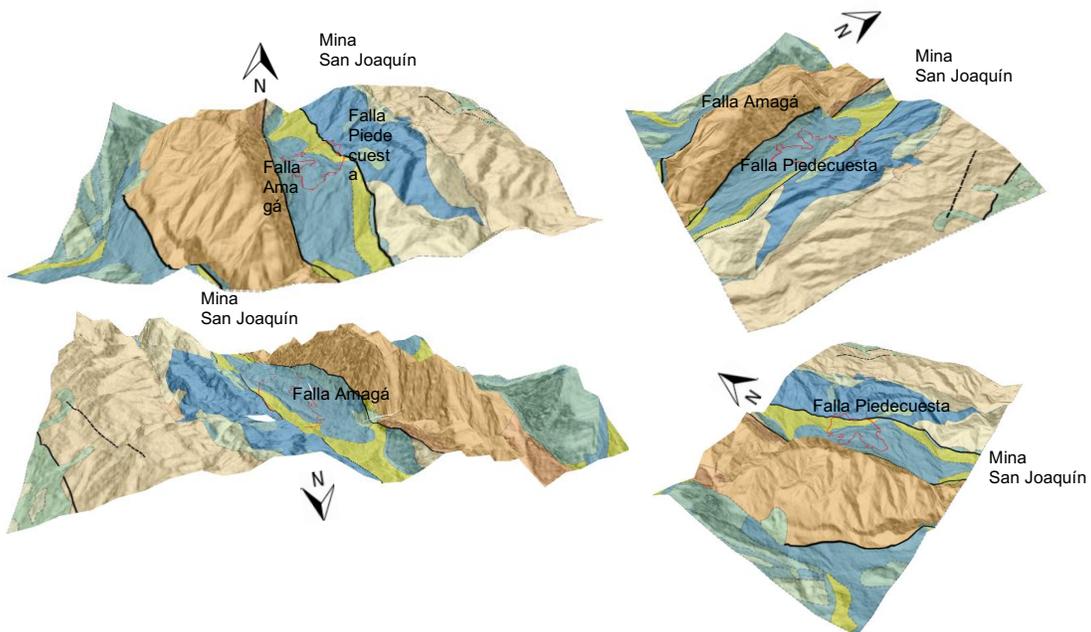


Figura 3. Mapa Geológico y topografía en 3D de la zona de estudio. Diagramas no a escala

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la realización de la caracterización geológica y geomecánica de la mina San Joaquín, para el diseño de explotación por el método de cámaras y pilares se esquematiza en la Figura 4 y se detalla a continuación:

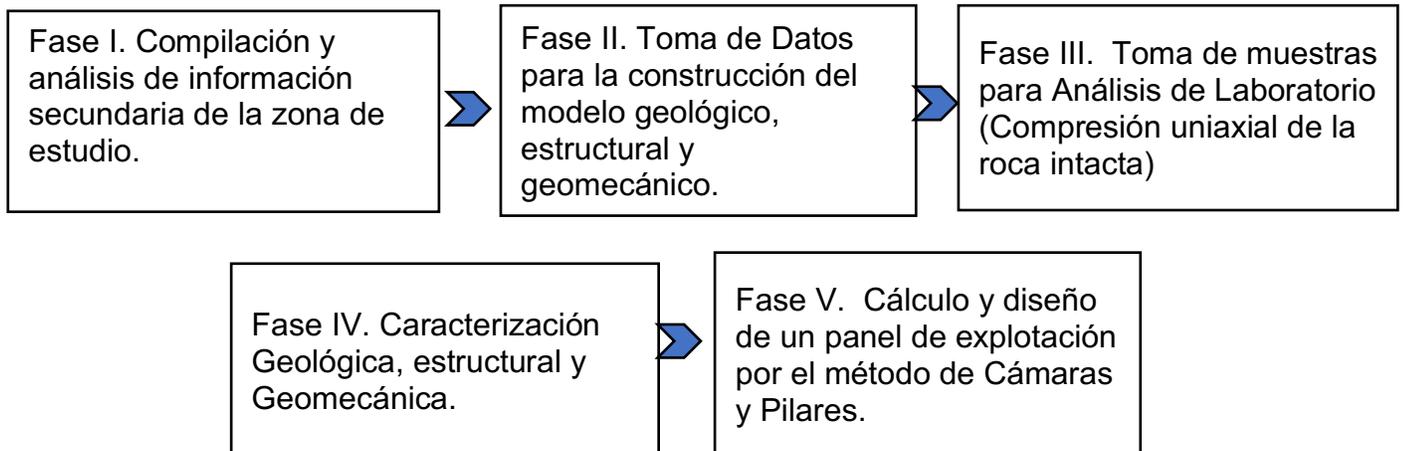


Figura 4. Esquema Metodológico para la realización del proyecto.

Fase I: En esta etapa se realizó una recopilación de la información bibliográfica existente sobre la Formación Amagá, para conformar una Geodatabase con las características geológicas, estratigráficas, estructurales y geomecánicas. Adicionalmente, se consultaron las metodologías de explotación subterránea de carbón y sus implicaciones en cuanto a subsidencia de índole minero. Algunos de los trabajos y artículos fundamentales que fueron incluidos son: Muñoz & Ordoñez 2015; Luo, 2015; Schleinig, 2017; Abdellah, 2015; IESC, 2014; Saharan et al.,2012; Castro Caicedo, 2012; entre otros.

Fase II: Durante la etapa de campo se realizó una recolección de datos geológicos, geomecánicos y estructurales en 40 estaciones para cada tipo de caracterización. Particularmente para la construcción del modelo geológico se tomaron datos dentro de la mina San Joaquín que pudieran plasmar en 3D la geometría y posición estratigráfica de los mantos, además de obtener la profundidad real a la cual se encuentran. Para ello se obtuvo una recopilación de coordenadas X, Y y Z en cada manto, su espesor real, características geológicas y estructurales *insitu*.

Fase IV: Se realizó una caracterización geológica 1:1 a partir de la descripción litológica de 13 muestras tomadas al interior de la mina y analizadas en un estereo-microscopio. Además de la consignación de datos geológicos y estructurales tomados en puntos estratégicos donde se pudiera visualizar lo siguiente: espesor, litología, rumbo/buzamiento de estratos y diaclasas; se realizó también el levantamiento de columnas estratigráficas en los inclinados que comunican manto 1 con manto 2 y manto 2 con manto 3 que finalmente se correlacionaron entre sí para formar una columna estratigráfica generalizada de la mina San Joaquín; estas fueron realizadas en el software Sedlog. Para la caracterización geomecánica se midieron los siguientes parámetros: tipo de discontinuidad, orientación, continuidad, abertura, relleno, rugosidad, espaciado, meteorización y filtraciones; en conjunto fueron consignados en una base de datos con el fin de calcular los índices geotécnicos como el RMR de Bieniawski (1989) y RQD (%), los cuáles determinan la calidad del macizo rocoso. Finalmente, para la caracterización estructural los datos obtenidos en cada estación sobre rumbo y buzamiento de los estratos, diaclasas y planos de falla fueron analizados en el programa Dips.

Fase III: Se extrajeron 8 muestras de roca las cuales fueron definidas en puntos donde la roca estuviese lo menos alterada posible (sin presencia de agua, aire, polvo y con menor fracturamiento) con el fin de realizar ensayos geotécnicos de compresión uniaxial, para determinar las propiedades físicas y de resistencia tanto de la roca encajante como de los mantos 1, 2 y 3. Estos análisis se desarrollaron en el laboratorio de suelos de la universidad EAFIT. Los datos de compresión simple fueron fundamentales para caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso y determinar la resistencia de las cámaras y pilares en la construcción del diseño de explotación.

Fase V: El diseño de explotación de carbón por el método de cámaras y pilares se realizó mediante la aplicación de una metodología basada en el artículo (Room and pillar panel design method to avoid surface subsidence, Luo 2015) donde se tuviera en cuenta la teoría del arco de presión para calcular los esfuerzos reales a los que se

encuentra expuesto el pilar. En un orden de ideas el cálculo de las dimensiones de las cámaras y pilares fueron obtenidas de acuerdo con una serie de fórmulas (ver tabla 1) en las cuales se tuviera en cuenta la siguiente metodología propuesta por Luo (2015).

1. Deflexión vertical máxima para calcular los anchos de las cámaras, en las cuales el factor de seguridad fuera entre 4 y 8, con el fin de evitar que el techo colapse.
2. Cálculo del arco de presión que genera la explotación en los pilares de producción.
3. Diseño de un sistema de pilares barrera en cada extremo del panel de explotación los cuales fueron calculados con toda la carga vertical *insitu* desde superficie hasta profundidad.
4. Estimación de la resistencia de los pilares mediante el criterio de Bieniawski (1975), esfuerzo que actúa sobre el pilar por medio del área tributaria y finalmente el cálculo de los factores de seguridad para los pilares (entre 1,5 y 2,0).
5. Cálculo de la tasa de recuperación mayor a 60% para ser económicamente factible la explotación por este método.

Posterior a cada cálculo se determinaron las dimensiones ideales de las cámaras y los pilares tanto de producción como de barrera con el fin de obtener un equilibrio entre la prevención de la subsidencia y una alta tasa de recuperación. Con los datos obtenidos se modeló en 3D el sistema de explotación en el Software Sketchup, el cual es un programa de modelado arquitectónico donde se pueden diseñar diferentes proyectos. Para la modelación del sistema de explotación se insertaron las dimensiones reales de las cámaras y los pilares, ancho del panel y longitud de los túneles de acceso (cm), y se incluyeron diferentes animaciones sobre minería de carbón tales como: banda transportadora, carbón, carrilera, coches, mineros y túneles (fueron diseñados con las dimensiones reales de la mina San Joaquín en ancho y alto). También se modelo el

techo del manto con texturas propias de rocas y fotos reales del carbón que fueron adjuntadas como texturas alternativas para hacer mas real el sistema de explotación.

Resistencia del pilar	$S_p = UCS \times \left(0.64 + 0.34 \times \frac{W}{H} \right)$
Esfuerzo que actua sobre el pilar	$\sigma_p = \sigma_v \frac{(W_p + W_o)(L_p + L_o)}{W_p L_p}$ <p>σ_v: Esfuerzo vertical In Situ. (MPa) L_p: Largo de la columna. (m) L_o: Distancia entre columnas a lo Largo de la excavación. (m) W_p: Ancho de la columna. (m) W_o: Distancia entre columna a lo ancho de la excavación. (m)</p>
Boveda de carga	b= Wa / 2 tan 21° donde Wa es el ancho del panel de explotación y b es la distancia vertical real que soporta cada pilar. b = H
Factor de seguridad y tasa de recuperacion	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $F S = \frac{(S_p)}{(\sigma_p)} = 1,5 \text{ a } 2$ <p>σ_{roca} Campo de esfuerzos presentes en el Md σ_p Campo de esfuerzos actuando sobre el pilar S_p Resistencia del pilar</p> </div> $R r = 1 - \left(\frac{W_p L_p}{(W_p + W_o)(L_p + L_o)} \right)$

Tabla 1. Formulas para el diseño metodologico de explotación por camaras y pilares.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentarán los resultados de la siguiente forma: Caracterización Geológica; Caracterización Estructural; Caracterización Geomecánica y Diseño de explotación por cámaras y pilares. La información soporte para los modelamientos, se presentan en forma de anexos (4, 8, 9 y 10).

4.1 CARACTERIZACION GEOLOGICA

4.1.1 Levantamiento geológico

Localmente, la zona de estudio hace parte de la cuenca Carbonífera Amagá-Angelópolis la cual corresponde a la porción central de la zona carbonífera en Antioquia (Ingeominas, 2004). De acuerdo con la caracterización geológica realizada en la mina San Joaquín, el carbón se presenta como un cuerpo geológico tabular, en el cual los respaldos de techo y piso son paralelos entre sí, es decir, que se describe

estratigráficamente como un yacimiento estratiforme. La columna estratigráfica entre manto 1 y 2, manto 2 y 3 se presenta en la figura 5. (La información detallada de cada estación se puede consultar en los Anexos 1 y 2 de Excel, Descripción de muestras y datos geológicos- estructurales).

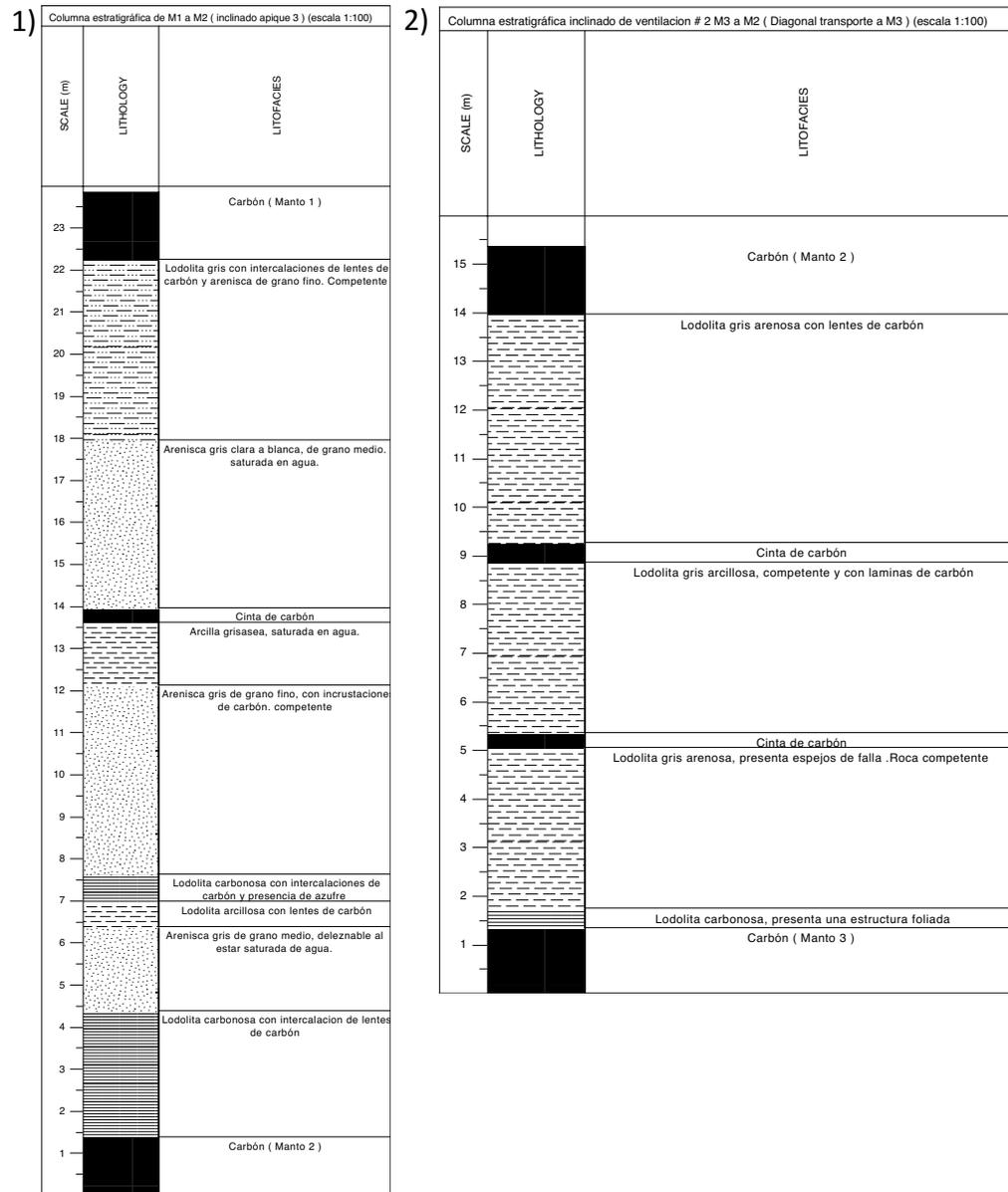


Figura 5. 1) Columna estratigráfica de Manto 1- Manto 2, 2) Columna estratigráfica de Manto 2- Manto 3

La descripción litológica de 13 muestras (Ver anexo 1 descripción de muestras) corresponde a los estratos de carbón de Manto 1, 2 y 3, los techos y pisos inmediatos de cada manto y rocas sectorizadas entre manto 1 y 2, manto 2 y 3.

En general, la mina se encuentra constituida por un conjunto de rocas sedimentarias tales como: Areniscas (40%), lodolitas arcillosas y arenosas (30%), lodolitas carbonosas (20%). La gran mayoría de las muestras presentan moscovita abundante al igual que laminación paralela y fragmentos de carbón. Algunas lodolitas y areniscas presentes en los respaldos de los techos son competentes, pero la mayoría de estas, al estar expuestas al aire, agua y la presión que se genera en los túneles de explotación, hace que la roca pierda su estado natural y por ende se produzca fracturamiento, ocasionando desprendimiento del techo.

En general, las areniscas guardan gran capacidad de almacenamiento de agua por su alta porosidad, por lo que algunas de ellas se encuentran saturadas en agua y se hacen deleznable. En manto 2 y 3 se presenta una roca que tiene aspecto de pizarra carbonosa, esta se caracteriza por ser la más frágil y poco compacta en toda la explotación, además de ser la causante de contaminación del Carbón que sale de manto 3.

Las areniscas constituyen el techo de manto 1 y en algunos sectores el de manto 2 y 3. Son de color gris, variando su tono de claro hasta oscuro. Muchas de ellas presentan laminación paralela de óxidos, materia orgánica y azufre. El grano es de tipo fino a medio, estructura masiva.

Las lodolitas son de color gris oscuro y las carbonosas son negras, son de grano fino y no se observa a simple vista los minerales que la componen. Algunas de ellas presentan fósiles de materia orgánica y textura cartilaginosa, y en su gran mayoría tienen espejos de falla.

El carbón de manto 1 presenta alta concentración de pirita y en algunos sectores se observó una franja gruesa de lodolita haciendo más difícil su extracción y como consecuencia la contaminación de este. Los tres mantos presentan nódulos de siderita, fractura concoidea y brillo vítreo.

4.1.2 Levantamiento Estratigráfico

Se realizó el levantamiento estratigráfico en escala 1:1, al interior de la mina, específicamente en los inclinados de ventilación que comunican a los mantos 1-2, 2-3 y la bajada principal de la mina. Posteriormente se construyó una columna estratigráfica generalizada por medio de correlación estratigráfica en la cual se ilustra los estratos que se presentan entre superficie hasta manto 3 (Ver anexo 3 columnas estratigráficas).

De acuerdo con el levantamiento estratigráfico realizado, se puede concluir que existe una correlación concordante entre los mantos y estratos de roca, con una intercalación de areniscas, lodolitas arenosas-arcillosas y pequeñas cintas de carbón; geometría homogénea, la cual muestra superficies de estratificación planas y paralelas entre si, estructura masiva y contactos tajantes-regulares entre los planos de estratificación. Algunos estratos de roca muestran estratificación cruzada, laminación paralela de carbón y óxidos (ver figura 6).

El tamaño de grano no varía significativamente; se mantiene constante y se caracteriza por ser de fino a medio. De acuerdo con las características geológicas y estratigráficas mencionadas anteriormente, y por correlación estratigráfica, se define esta sección como un conjunto de capas que pertenecen al miembro medio de la Formación Amagá (González,2001).



Figura 6. A) Estratificación cruzada, B) laminación paralela de carbón y óxidos.

5. MODELAMIENTO 3D -GEOMODELER

Como se indicó en la metodología, los datos tomados en campo, junto a la geodatabase existente en la Universidad EAFIT sobre la formación Amagá (columnas estratigráficas, información de pozos, y el logeo del pozo de exploración realizado en el 2011 por Geominas), se usó el Software Geomodeler, para la modelación geológica de los mantos 1, 2 y 3 de la mina San Joaquín, con el fin de identificar la geometría, continuidad y homogeneidad entre ellos. Para la realización de este modelo se recolectaron datos de coordenadas x, y z, dentro de la mina con el fin de interpolar los datos para zonificar cada manto en su respectiva posición estructural y geológica.

Toda la información detallada del modelamiento se puede consultar en el Anexo 4; la figura 7 muestra diferentes ángulos de vista del modelo geológico; se observan 3 capas de color negro (manto 1), rojo (manto 2) y azul (manto 3). También podemos visualizar el cambio en el espesor para cada manto (1,8 metros para manto 1, 1,4 para manto 2 y 1,3 para manto 3). El modelo geológico incluye 3 cortes que determinan la continuidad geométrica, estructural y geológica de los mantos. En la figura 7.4 se puede ver la topografía y el área de concesión 11338 de la Mina San Joaquín y en la figura 7.5 se presenta el pozo exploratorio en color rojo.

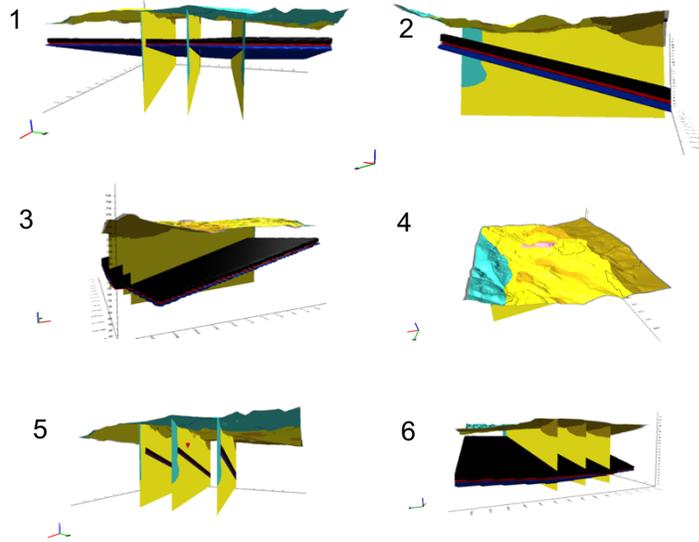


Figura 7. Modelamiento geológico de los mantos de explotación de la mina San Joaquín.

6. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

La mina San Joaquín forma parte del denominado Sinclinal de Amagá, el cual se encuentra fallado en ambos flancos (Referido al mapa geológico Figura 2), al Este por la falla Piedecuesta y al Oeste por la falla Amagá (Plancha geologica 146 Medellin Occidental, Ingeominas, 2004). De acuerdo con la caracterización estructural, durante el levantamiento de campo, se identificaron diferentes estructuras: planos de estratificación, fallas, diaclasas y foliaciones. Los datos se resumen en la tabla 2 y se detallan en el anexo 5. Los mantos de carbón presentan espesores promedios de 1.8 m (Manto 1), 1.3 m (Manto 2) y 1.4 m (Manto 3). Estos mantos y sus estratos suprayacentes se encuentran con una inclinación poco pronunciada, con una tendencia estructural promedio de $150/ 17^{\circ}\text{SW}$. Los planos de falla muestran movimientos inversos y normales, en el área de manto 3 cercana a la falla Piedecuesta en su contacto con el sinclinal de Amagá, el manto de carbón comienza a inclinarse, alcanzando buzamientos de 22° conservando la misma dirección. A continuación, se describen las principales características por manto.

Manto	Rumbo/ buzamiento	Espesor Promedio
1	150/17SW	1,8 m
2	155/17SW	1,3 m
3	150/17SW	1,4 m

Tabla 2. Espesor y datos estructurales promedio de los mantos 1, 2 y 3.

6.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL MANTO 1

Lo diferentes diagramas de densidad de polos y diagrama de rosas se resumen en los diagramas siguientes donde se muestran los datos recolectados en las diferentes estaciones de control estructural tanto en carbón como en la roca techo. A partir del diagrama de densidad de polos (Fig. 8B) se puede decir, que los planos de diaclasas tienen un alto ángulo de buzamiento ($>70^\circ$) ya que hay mayor densidad de estos cerca de la primitiva. También se puede determinar que hay una concentración mayor en la dirección NE-SW. El diagrama de rosas del rumbo de los planos de diaclasas (Fig. 8C) muestra que la dirección preferente de los planos es NW-SE. En la figura 9 podemos observar las diaclasas en carbón y techo de manto 1.

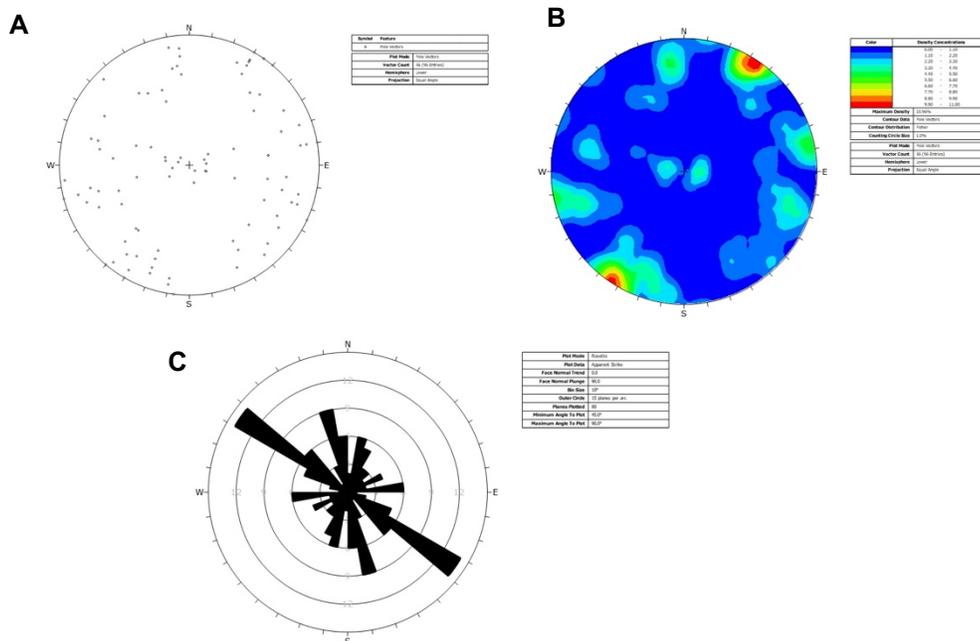


Figura 8. Diagramas representativos de diaclasas en el carbón y techo inmediato de Manto 1. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de diaclasas.



Figura 9. Diaclasamiento del carbón y roca techo en Manto 1, se observan entre 2 y 3 familias de diaclasas.

6.1.1 PLANOS DE FALLA MANTO 1:

A partir del diagrama de densidad de polos (Fig. 10b) se puede concluir que mas del 50% de los planos de falla presentan un bajo angulo de buzamiento ($< 50^\circ$), los demas planos de falla presentan un alto angulo de buzamiento ($>70^\circ$) pero con menor densidad dentro del sistema estructural. El diagrama de rosas muestra que la tendencia de movimiento de los planos de falla tuvo un sentido NW-SE, las componentes de estos planos de falla se caracterizan por ser inversos y normales. En la figura 11 se puede observa una falla de tipo normal en manto 1.

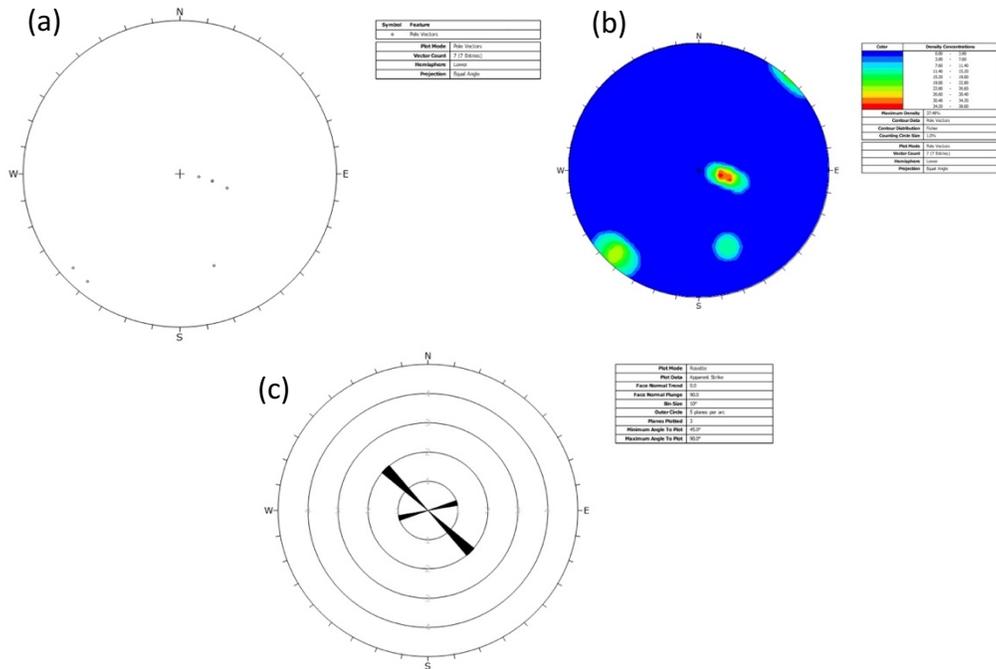


Figura 10. Diagramas representativos de planos de falla en Manto 1. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de los planos de falla



Figura 11. Falla de componente normal presente en manto 1. N80W/70°, V= 60 cm

6.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL MANTO 2

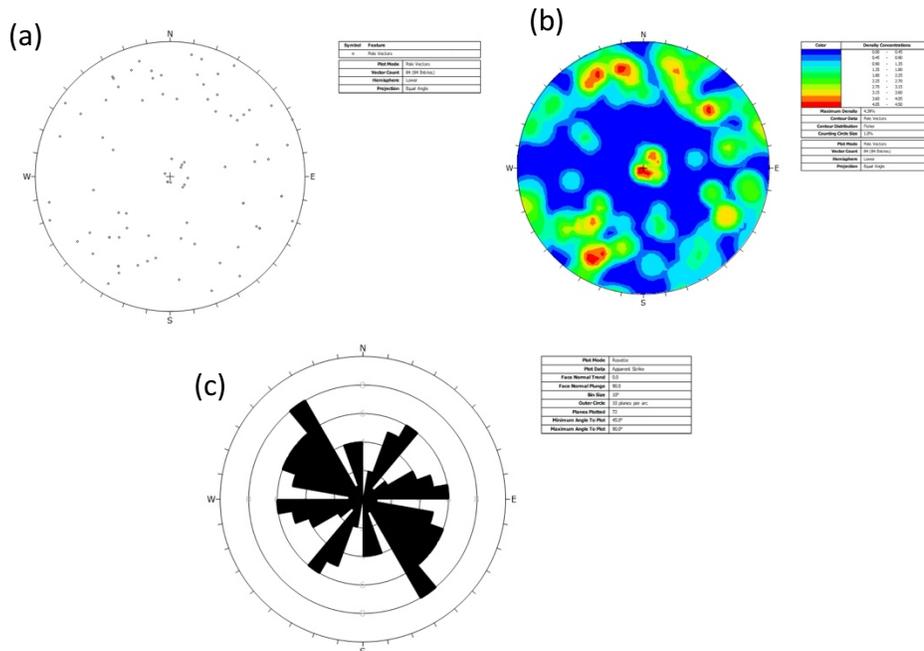


Figura 12. Diagramas representativos de diaclasas en el Carbón y techo de Manto 2. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de diaclasas

Según la (fig 12B), muestra que las densidades de polos se encuentran distribuidos en el estereograma de manera heterogénea, mostrando así una tendencia de varias familias de diaclasas. En el sentido NW-SW se encuentra una mayor concentración de los datos estructurales caracterizados por tener un ángulo medio de buzamiento (40° a 60°) debido a que se encuentran en la mitad de la primitiva y el punto de origen. El diagrama de rosas muestra una tendencia de dirección en dos sentidos NW-SE y NE-SW (Figura 12C). En la figura 13 se observan los planos de diaclasas y las cuñas formadas por la intersección de estas.

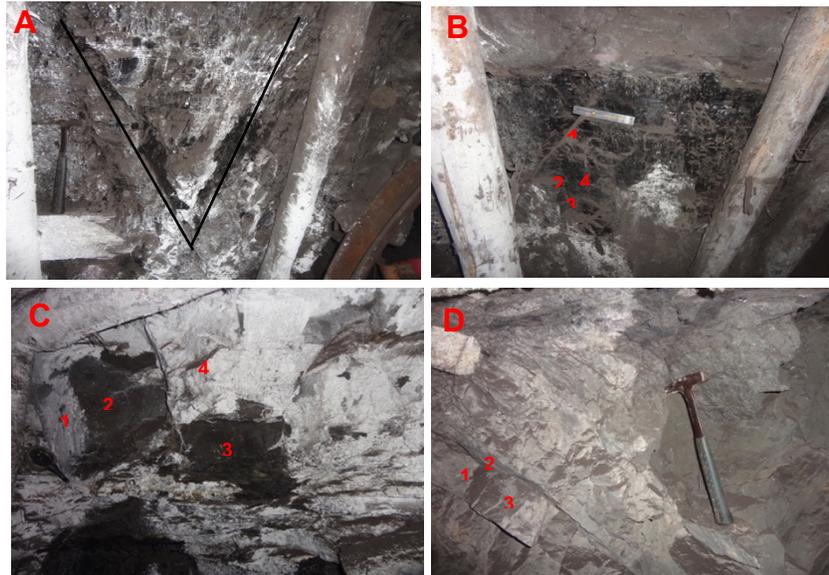


Figura 13. A) Se observa una cuña formada por la intersección de dos familias de diaclasas presentes en el carbón. B) 4 familias de diaclasas en carbón Manto 2, C y D) se observa el techo inmediato de manto 2 con la presencia de 4 familias de diaclasas.

6.2.1. PLANOS DE FALLA MANTO 2.

Los planos de falla que se midieron en manto 2 muestran en el diagrama de densidad de polos (Fig 14b) un ángulo medio de buzamiento (30° y 50°) ya que se encuentran en el punto medio entre la primitiva y el punto de origen. Según el diagrama de rosas (Fig 14c) los planos de falla muestran un movimiento sentido NW-SE. En la figura 15 podemos observar un plano de falla en roca manto 2.

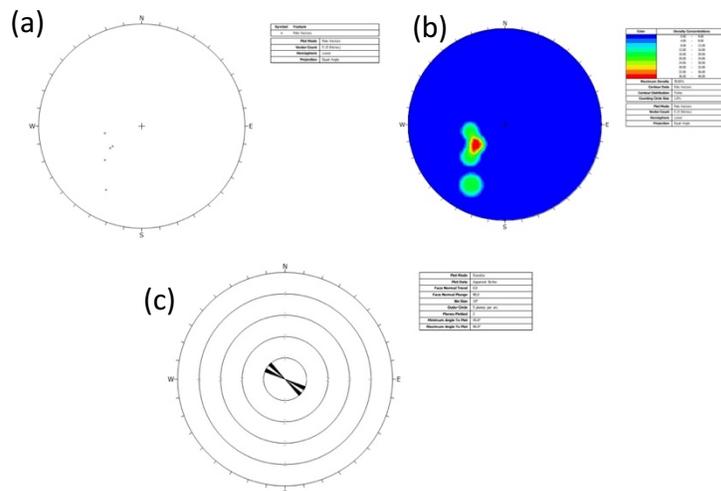


Figura 14. Diagramas representativos de planos de falla en Manto 2. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de los planos de falla.

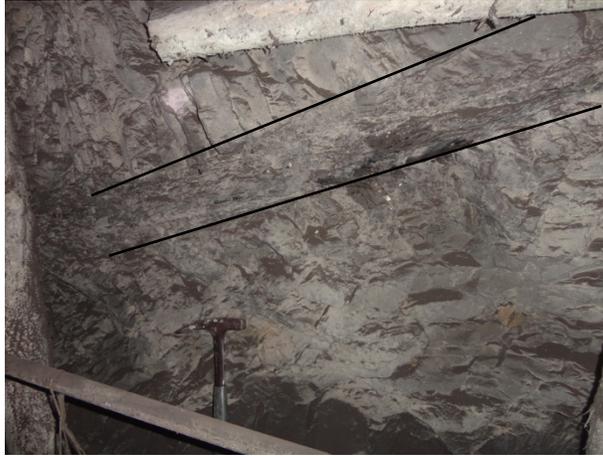


Figura 15. Techo inmediato de Manto 2 donde se puede observar un plano de falla relleno del mismo material de roca pero mas triturado.

6.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL MANTO 3

A partir del diagrama de densidad de polos (Fig. 16b) se determina que los planos de diaclasa en el carbón y techo de manto 3 presentan un ángulo medio de buzamiento (40° a 60°), además se muestra una concentración especial en la dirección SW; en el diagrama de rosas (Fig. 16c) se observan 2 tendencias de dirección de las diaclasas en sentido NW-SE y NE-SW. En la figura 17 se observan las diferentes diaclasas que componen el macizo rocoso de manto 3, algunas forman cuñas debido a la intersección de 2 familias de diaclasas y deformaciones en forma de S en el carbón debido a la presencia de fallas inversas que generan el arrastre o plegamiento. En la figura 18 se presenta una falla de tipo inverso en el carbón de manto 3.

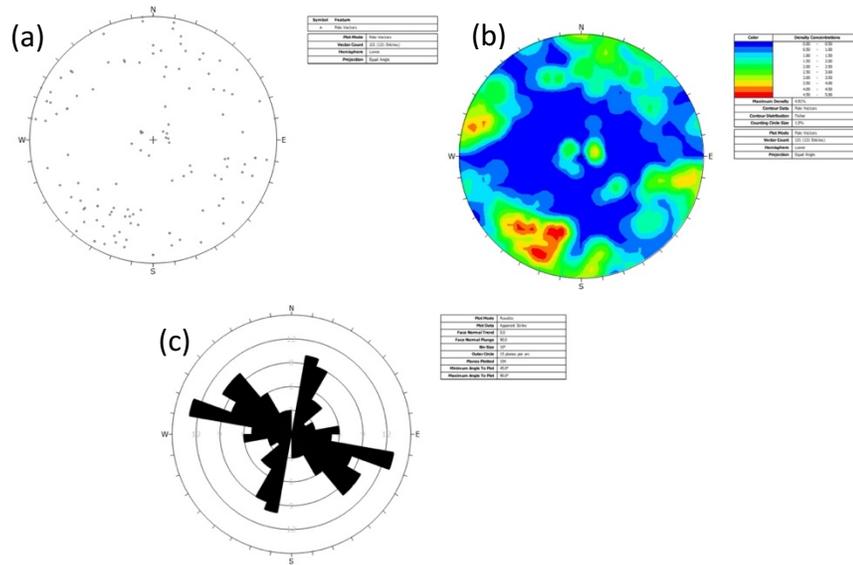


Figura 16. Diagramas representativos de diaclasas en el Carbón y techo de Manto 3. (a) Diagrama de polos, (b) Diagrama de densidad de polos, (c) Diagrama de rosas de los rumbos de diaclasas.

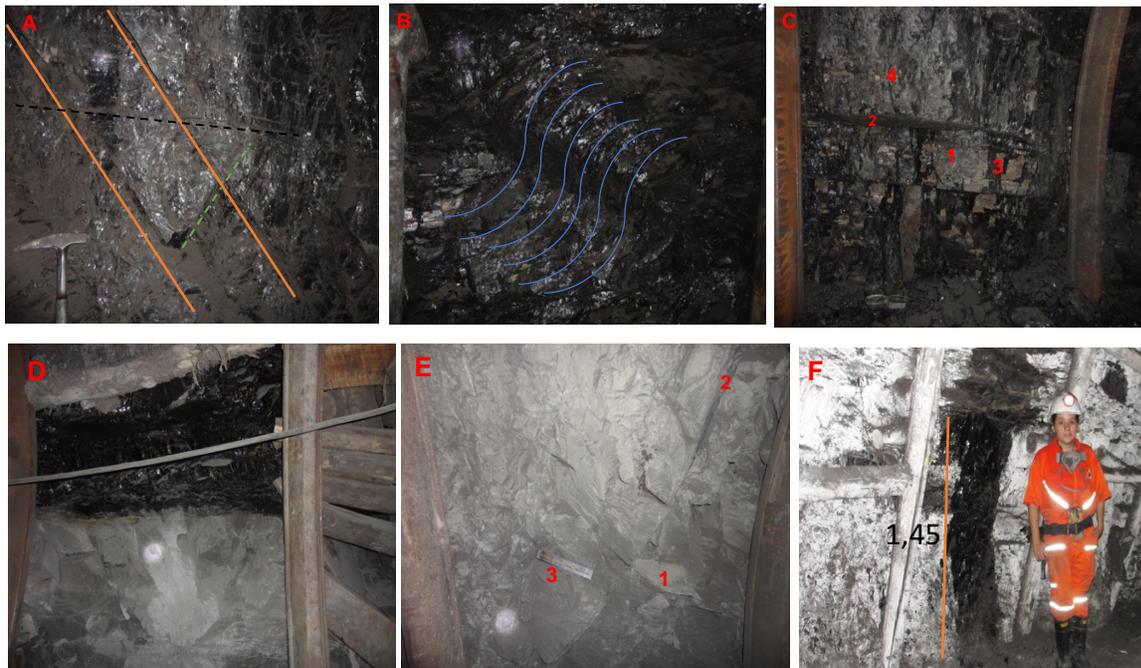


Figura 17. A) diaclasamiento en carbón Manto 3, formando cuñas, B) Carbón deformado formando una estructura en S. C) Se observan 4 familias de diaclasas. D) Se observa el piso y el carbón de manto 3, e) Se observan 3 familias de diaclasas en el techo de manto 3, F) Espesor del manto 3 (1,45) y se observa parte del techo.



Figura 18. A) se observa la interrupción de manto 3 debido a una falla inversa, B) Falla inversa, C) Se observa el plano de falla.

De acuerdo con las caracterizaciones estructurales descritas anteriormente en los 3 mantos de explotación de la mina San Joaquín, se pueden resumir los siguientes aspectos:

- Tanto las diaclasas en el carbón como en la roca de cada manto presentan una tendencia de dirección en sentido NW-SE y NE-SW.
- La mayor concentración de datos estructurales en los diagramas de densidad de polos, muestra que los ángulos de buzamiento de los planos de diaclasa en roca y carbón en los mantos 1, 2 y 3 presentan un alto ángulo de buzamiento ($>70^\circ$).
- En manto 3, solo se pudo medir una falla de tipo inverso con un rumbo de 314/ 26SW, el sector de explotación donde se encuentra este manto tiene una influencia importante marcada por la presencia de la falla Piedecuesta, limitando el lado este del área de concesión.
- Dentro de la zona de explotación, las fallas que se encuentran son de tipo inversa y normal con desplazamientos de hasta 6 metros, pero aún no se han encontrado fallas, pliegues o pinchamientos donde se llegue a la interrupción total del carbón.
- Los planos de falla presentes en los mantos 1 y 2, presentan una dirección de movimiento homogénea NW-SE.
- La caracterización estructural, permitió concluir que todas las estructuras presentes (diaclasas y planos de falla) en la zona de explotación (manto 1, 2 y 3), se encuentran alineadas preferencialmente en sentido NW-SE.

- La influencia del régimen de fallamiento regional marcado por las fallas Piedecuesta y Amagá es evidente, en el sentido de dirección del rumbo de los planos NW-SE. Estas fallas, encontradas dentro del sistema estructural que comprende la zona de explotación de los 3 mantos son estructuras secundarias producidas por el esfuerzo principal de estas fallas de régimen regional.
- De acuerdo con los datos obtenidos en los diferentes mantos (1, 2 y 3) se encuentran 5 familias de diaclasas tanto en el carbón como en la roca techo.
- En manto 3, se observó una estructura en S, la cual es evidenciada por la presencia de una falla inversa que genera este tipo de deformación en el carbón.

7. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

La caracterización geomecánica de un macizo rocoso es de vital importancia cuando se trata de explotaciones subterráneas, debido a que cuando se realiza una excavación a gran profundidad se alteran las condiciones naturales de la roca y por ende se genera un cambio en la estabilidad del macizo, respondiendo este a la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico.

Los macizos rocosos se ven afectados por la presencia de discontinuidades estructurales tales como: planos de falla, estratificación y diaclasas (Vallejo, 2004). Las roturas y deformaciones que se presentan en las rocas suelen producirse a favor de los planos de debilidad, los cuales constituyen las superficies de discontinuidad; esto junto con algunos factores geológicos como la litología, propiedades de la matriz rocosa, estructura geológica, discontinuidades y grado de meteorización, dominan el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y su capacidad de resistencia ante la aplicación de esfuerzos internos y externos (e.g. Hoek & Brown, 1980; Bieniawski, 1976; Bieniawski, Z T, 1989).

Las discontinuidades tienen una influencia directa en el comportamiento del macizo rocoso, debido a que éstas imprimen un carácter discontinuo y anisotrópico a los

macizos, haciendolos más deformables y débiles. Estas discontinuidades representan planos preferentes de alteración, meteorización y fractura, que permiten el flujo de agua. Por esto, su reconocimiento, descripción y caracterización es fundamental para el estudio del comportamiento mecánico del macizo rocoso (e.g. Vallejo, 2004, Bieniawski, 1983)

Los parámetros de observación y medición para la caracterización geomecánica fueron tomados en campo, en base a las normas sugeridas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM – International Society for Rock Mechanics), estos fueron registrados en tablas de Excel. Para cada manto, se realizaron 40 estaciones de caracterización geomecánica (ver anexo 6) en las cuales se midieron diferentes parámetros para caracterizar las discontinuidades presentes en el macizo : Tipo de discontinuidad (estratificación, falla o diaclasa; continuidad; abertura; relleno, rugosidad; grado de meteorización; espaciado; filtraciones; resistencia de la discontinuidad; resistencia de la roca inalterada (ensayos de compresión simple); geología (tipo de roca) y RQD.

Palmstrom (1982), sugirió que cuando no es posible hacer perforaciones, pero las discontinuidades son visibles en las superficies expuestas, el RQD se puede estimar a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen mediante la siguiente ecuación (Ecuación 1).

$$RQD = 115 - (3.3) J_v \text{ (Ecuación 1).}$$

Donde: J_v = número de fisuras por metro cúbico.

El RQD representa el índice de calidad de la roca intacta el cual considera el grado de fracturación del macizo rocoso. El **RMR de Bieniawski**: Es uno de los sistemas de clasificación geomecánica del macizo rocoso, donde se establecen los diferentes grados de calidad del macizo en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las

discontinuidades. La Figura 19 muestra una representación esquemática de los parámetros anteriormente mencionados.

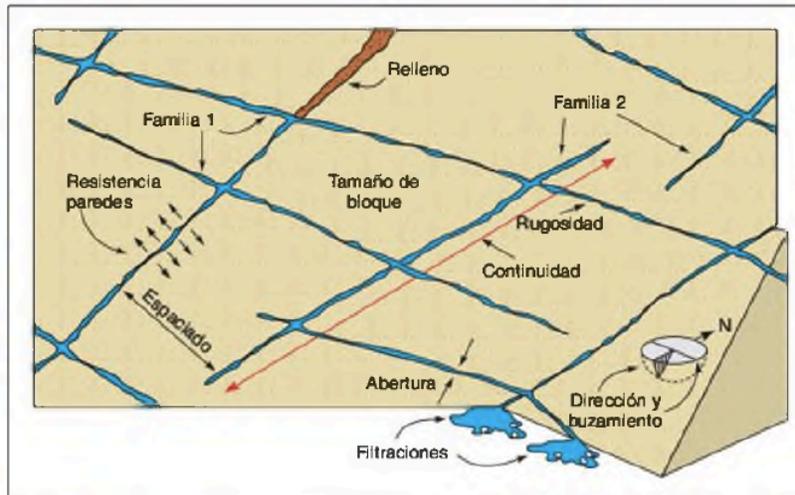


Figura 19. Representación esquemática de los parámetros de las discontinuidades. Tomado de Vallejo, 2004.

7.1 Caracterización geomecánica de manto 1, 2 y 3

En las siguientes tablas se resume de manera proporcional los datos promedio (>50%) para la clasificación geomecánica del macizo rocoso en el cual esta comprendido la mina San Joaquín. La clasificación geotécnica incluye los parámetros de descripción y los diferentes tipos de discontinuidad presentes en el macizo rocoso con el fin de determinar y caracterizar por medio de la clasificación RMR, RQD y ensayos de compresión simple la calidad del macizo rocoso presente en la mina San Joaquín.

Datos promedio (>50%) de clasificación macizo rocoso Manto 1											
Parametros de clasificación/ Tipos de discontinuidad	Continuidad	Abertura	Relleno	Rugosidad	Espaciado	Meteorización	Filtraciones	Resistencia de la Discontinuidad	Resistencia de la Roca Inalterada	RQD (%)	Clasificación RMR (Tipo de macizo rocoso)
Plano de Estratificación	1-3 m (Baja continuidad)	< 0,1 mm (muy cerrada)	sin relleno	Ondulada-lisa	60-200 mm (junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R3- Roca moderadamente dura	46,93 MPA	52% (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)
Diaclasa en roca	<1m (muy baja continuidad)	0,25-0,5 mm(parcialmente abierta)	sin relleno	Ondulada-lisa	<20 mm (extremadamente junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R2- Roca blanda	46,93 MPA	49% (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)
Diaclasa en Carbón	<1m (muy baja continuidad)	0,1 mm (cerrada)	sin relleno	ondulada-lisa	<20 mm (extremadamente junto)	Fresca- I	seca	R2- Roca blanda	16,32 MPA	58,9 (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)

Tabla 3. Datos promedio para cada parámetro de descripción de las discontinuidades presentes en Manto 1.

Datos promedio (>50%) de clasificación macizo rocoso Manto 2											
Parametros de clasificación/ Tipos de discontinuidad	Continuidad	Abertura	Relleno	Rugosidad	Espaciado	Meteorización	Filtraciones	Resistencia de la Discontinuidad	Resistencia de la Roca Inalterada	RQD (%)	Clasificación RMR (Tipo de macizo rocoso)
Plano de Estratificación	1-3 m (Baja continuidad)	< 0,1 mm (muy cerrada)	arcilla	Ondulada-rugosa	60-200 mm (junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R2- Roca blanda	31,45 MPa	55% (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)
Diaclasa en roca	<1m (muy baja continuidad)	< 0,1 mm (muy cerrada)	sin relleno	plana-rugosa	60-200 mm (junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R3- Roca moderadamente dura	32,03 Mpa	55,2 % (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)
Diaclasa en Carbón	<1m (muy baja continuidad)	0,25-0,5 mm(parcialmente abierta)	sin relleno	plana-lisa	20-60 (muy junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R2- Roca blanda	8,33 Mpa	52,3% (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)

Tabla 4. Datos promedio para cada parámetro de descripción de las discontinuidades presentes en Manto 2.

Datos promedio (>50%) de clasificación macizo rocoso Manto 3											
Parametros de clasificación/ Tipos de discontinuidad	Continuidad	Abertura	Relleno	Rugosidad	Espaciado	Meteorización	Filtraciones	Resistencia de la Discontinuidad	Resistencia de la Roca Inalterada	RQD (%)	Clasificación RMR (Tipo de macizo rocoso)
Plano de Estratificación	1-3 m (Baja continuidad)	< 0,1 mm (muy cerrada)	carbón, azufre y oxidos	Ondulada-rugosa	60-200 mm (junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R3-moderadamente dura	61,33 MPa	58,9% (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)
Diaclasa en roca	<1m (muy baja continuidad)	< 0,1 mm (muy cerrada)	sin relleno	plana-rugosa	60-200 mm (junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R3- Roca moderadamente dura	32,46 Mpa	49% (Calidad mala)	Tipo III (macizo de calidad media)
Diaclasa en Carbón	<1m (muy baja continuidad)	0,5-2,5 mm (abierto)	sin relleno	plana-lisa	20-60 (muy junto)	ligeramente meteorizada-II	seca	R2- Roca blanda	20,39 Mpa	56,54% (Calidad media)	Tipo III (macizo de calidad media)

Tabla 5. Datos promedio para cada parámetro de descripción de las discontinuidades presentes en Manto 3.

Para la caracterización geomecánica es indispensable realizar ensayos de compresión simple, los cuales determinan las propiedades mecánicas de las rocas; a partir de este dato podemos calcular la resistencia de los macizos rocosos ante la aplicación de fuerzas externas e internas, así como el cálculo detallado que deben tener las excavaciones subterráneas. A continuación, se pueden observar los diferentes ensayos de compresión simple realizados para cada manto de explotación. (figura 20 y tabla 6, consultar anexo 7 ensayos completos de compresión simple de 8 muestras de roca de la mina San Joaquín).



Figura 20. Proceso de ensayo de compresión simple, desde la extracción del núcleo hasta el fallamiento final de la roca.

Roca	Compresión simple (Mpa)
Manto 1	16,32
Techo inmediato mto 1	46,93
Manto 2	8,33
Techo inmediato mto 2	32,03
Manto 3	20,39
Techo inmediato mto 3	32,46

Tabla 6. Valores de compresión simple para los mantos 1,2 y 3 y el techo de cada uno de ellos.

La caracterización geomecánica de los 3 mantos de explotación, permitió homogenizar el macizo rocoso en cuanto a estructuras de discontinuidad y sus respectivos parámetros de clasificación. De acuerdo con las tablas anteriormente descritas, se determinó que el macizo rocoso comprendido en el área de concesión minera donde se encuentran los mantos 1, 2 y 3, es un cuerpo geológico estructural homogéneo, donde el tipo de calidad del macizo rocoso es media, es decir expresa la calidad de la roca para su uso en obras de ingeniería o minería. Es así que, un macizo rocoso Clase III es clasificado como medio, es decir que es un macizo rocoso ni muy duro ni muy blando, fracturado, con algunas filtraciones representativas y ligeramente meteorizado, representa varios problemas frente a su estabilidad y resistencia, por lo tanto, se deduce que tendrá una capacidad portante media, permitirá la excavación subterránea pero será necesario la implementación de medidas de estabilización y refuerzo sus túneles.

En general se puede concluir que el fracturamiento de la roca y la presencia de varias familias de diaclasas, ha influido directamente en la estabilidad del macizo rocoso, el acuñaamiento de los planos de debilidad ejercen fuerzas *insitu* que exponen al techo del manto a caídas inmediatas de bloques de roca. También estas diaclasas presentes en el carbón, hacen que su resistencia sea baja y que no permita formar pilares fuertes de protección. Las pocas filtraciones dentro de las discontinuidades es una ventaja para el medio rocoso, debido a que el agua es un agente de meteorización muy fuerte, puede debilitar la matriz rocosa y por ende hacer del medio de explotación un obstáculo para la extracción del mineral, para el sostenimiento y principalmente para la estabilidad del macizo rocoso.

8. DISEÑO DE EXPLOTACIÓN POR CÁMARAS Y PILARES

La mina San Joaquín utiliza el método de extracción por tajo largo con derrumbe dirigido, debido a que su alta eficiencia en las tasas de producción y aprovechamiento del mineral, han causado que este sea el principal sistema de explotación en minería subterránea de carbón (Schleinig et al 2017). A pesar de ser uno de los más

provechosos métodos existentes en la minería de carbón conlleva a tener problemas de inestabilidad del terreno, cuando se realiza la extracción del carbón (Flook et al 2008).

Este crea un vacío subterráneo donde el techo de cada manto se derrumba a medida que se extrae el carbón. Esto típicamente resulta en un movimiento horizontal y vertical en superficie que puede extenderse más allá del área de concesión minera, afectando la infraestructura superficial durante el avance de la explotación. A medida que la onda de subsidencia se aproxima a un punto de la superficie, el suelo comienza a asentarse, se desplaza horizontalmente hacia el vacío y se somete a esfuerzos de tracción. (IESC, 2014)

El diseño de un nuevo método de explotación de carbón en la mina San Joaquín (Cámaras y Pilares), se basó en la búsqueda de un equilibrio entre una alta tasa de recuperación y la reducción total o parcial de la subsidencia. Se emplea una metodología sistemática de diseño, aplicando la teoría del arco de presión, donde los pilares de producción son protegidos por pilares barrera en cada extremo del panel de explotación, buscando disminuir las presiones verticales que se puedan generar durante la extracción del mineral. Los pilares de producción están diseñados para soportar la carga que se encuentra debajo del arco de presión, mientras que los pilares barrera soportan la sobrecarga total de la columna de roca cuando los pilares de producción fallan. Con esta metodología propuesta, se minimiza la posibilidad de fallas en los paneles de producción y los pilares barrera pueden contener los efectos de cualquier colapso dentro del panel de producción. También por medio de este enfoque metodológico de cámaras y pilares, existe la posibilidad de que la subsidencia inmediata y futura pueda reducirse en gran medida (Luo, 2015, Guy et al., 2017).

Las condiciones de extracción por este método de explotación consiste en alcanzar un equilibrio entre una alta tasa de recuperación y alto factor de seguridad, con el fin de que los pilares tengan dimensiones ideales para que puedan resistir la carga que se ejerce sobre ellos y por ende el ancho de las cámaras sea el adecuado para que el techo no colapse (Luo, 2014). En el siguiente diagrama se ilustra la metodología utilizada en el diseño de explotación de carbón por cámaras y pilares (Ver Figura 21).

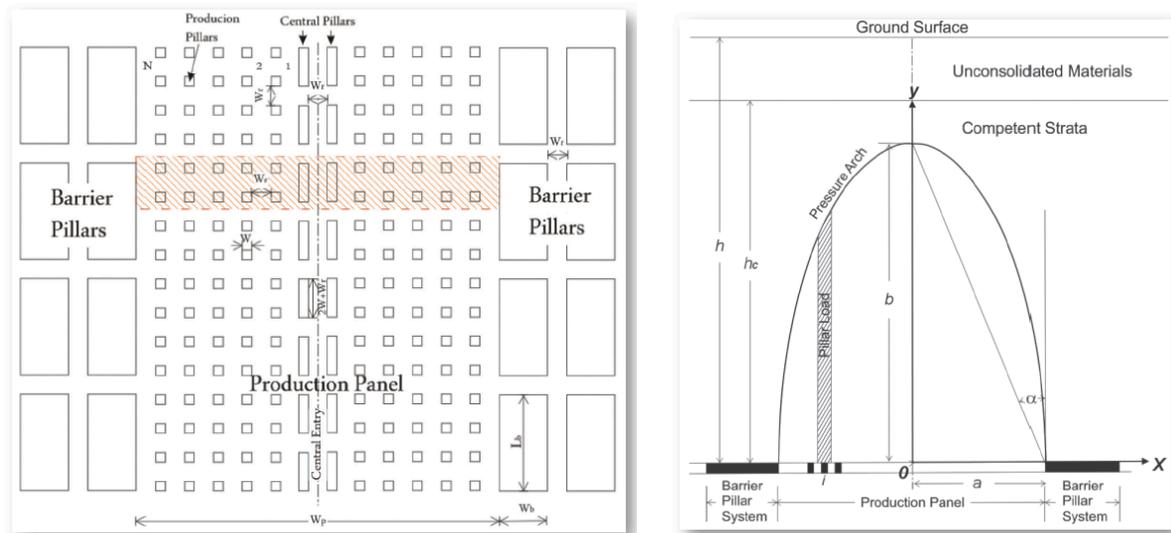


Figura 21. A) Metodología de diseño de explotación por cámaras y pilares para los 3 mantos de carbón en la Mina San Joaquín. B) Arco de presión sobre el sistema de explotación.

De acuerdo con Luo, 2015; el diseño de los pilares barrera es de vital importancia para la explotación por el método de cámaras y pilares, ya que sus dimensiones son mayores a los pilares de producción y por ende actúan como una protección al panel principal. Son diseñados para que soporten toda la sobrecarga de la columna de roca en condiciones extremas. Un fuerte sistema de pilares barrera, proporcionará dos beneficios para la seguridad minera y operaciones de explotación: (1) sirve como la base de los arcos de presión para asegurar su estabilidad, y (2) contiene cualquier falla de los pilares de producción dentro del panel.

El diseño de este método bajo los estándares metodológicos mencionados anteriormente, y agregando un alto factor de seguridad entre 1,5 y 2,0 tanto para los pilares barrera como para los de producción, además de obtener un alto factor de seguridad del techo de las cámaras, el cual debe estar en el rango de 4 a 8; si se cumplen estas condiciones básicamente se elimina el fenómeno de subsidencia en superficie. (York et al., 2000, Abdellah, 2015)

8.1 Diseño de explotación de cámaras y pilares para Manto 1, 2 y 3

El diseño de explotación por el método de cámaras y pilares se desarrolló bajo la metodología anteriormente descrita para los tres mantos en explotación actual. Las tablas 7, 8 y 9, corresponden al diseño de las dimensiones del ancho y largo del pilar, factor de seguridad del techo y del pilar, y el factor de recuperación tanto en los pilares barrera como los de producción, para cada panel de explotación correspondiente a los mantos 1, 2 y 3. El procedimiento de cálculo con fórmulas correspondientes se presentan en el anexo 8, 9, y 10.

Dimensiones ideales para la explotación por cámaras y pilares en Manto 1						
	Wo	Fs Techo	Fs Pilar	Wp	Lp	% Recuperación
Pilares Barrera	4	7,7	2	10	24	63,9%
Pilares de producción	4	7,7	1,8	8,0	4	

Tabla 7. Dimensiones para el diseño por cámaras y pilares Manto 1.

Dimensiones ideales para la explotación por cámaras y pilares en Manto 2						
	Wo	Fs Techo	Fs Pilar	Wp	Lp	% Recuperación
Pilares Barrera	6,5	6,9	2,0	10	18,5	67,0%
Pilares de producción	6,5	6,9	2	10,0	7,5	

Tabla 8. Dimensiones para el diseño por cámaras y pilares Manto 2.

Dimensiones ideales para la explotación por cámaras y pilares en Manto 3						
	Wo	Fs Techo	Fs Pilar	Wp	Lp	% Recuperación
Pilares Barrera	6	7,9	2,0	6,0	12	80,0%
Pilares de producción	6	7,9	2,0	6,0	4	

Tabla 9. Dimensiones para el diseño por cámaras y pilares Manto 3.

Una vez construidos los pilares barrera, el carbón será extraído sistemáticamente con el fin de proteger al máximo la explotación y evitar así la subsidencia inmediata o futura. En la mina San Joaquín existen muchas ventajas para este tipo de explotación, debido a que la explotación actual ya cuenta con la ventilación, las vías principales y secundarias necesarias, además de las bandas transportadoras. Por lo tanto, los costos de operación no serán tan altos y por esto es más factible en términos económicos la extracción de carbón por el método propuesto. Los 3 paneles de explotación se caracterizan por ser marginales, es decir, son zonas para explotación pero que no se han podido extraer debido a los problemas de subsidencia que causarían en superficie.

De acuerdo con las tablas anteriores, se realizó, un modelamiento animado en el Software Sketchup de uno de los paneles de explotación por el método de cámaras y pilares. (Ver Anexo 11 y 12 modelamiento en el Software Sketchup). En la figura 22a se observa la entrada principal a la mina San Joaquín con el fin de que el video de modelación se pudiera dimensionar de una manera mas real. En la figura 22b se puede ver la animación del terreno donde se encuentra la mina San Joaquín, en la figura 22c,d y g se presentan los túneles de acceso, la carrilera con los coches, las bandas transportadoras de carbón y mineros; en la figura 22e,f y h se puede visualizar el diseño de explotación por cámaras y pilares (pilares barrera en los extremos y los pilares de producción en el centro).

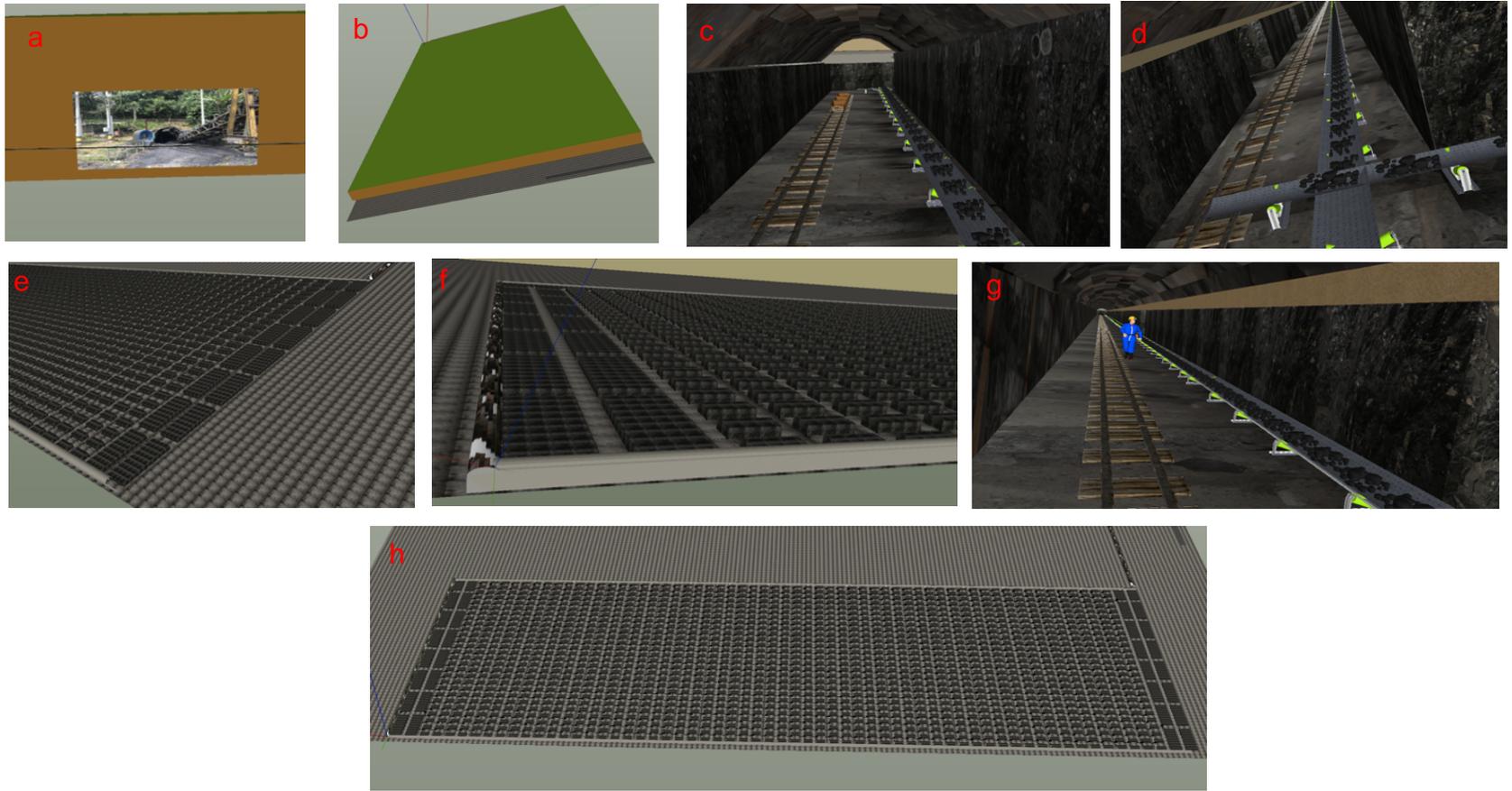


Figura 22. Modelamiento del diseño de explotación por cámaras y pilares.

9. DISCUSIÓN

La caracterización geológica, geomecánica y estructural en un diseño de exploración y explotación minera, es de vital importancia al momento de iniciar la construcción subterránea y los paneles de explotación, debido a que si se caracteriza de manera consistente, sistemática y puntual el macizo rocoso donde se realizará la extracción del carbón, se podrán conocer las características físicas y el comportamiento mecánico de las rocas ante los posibles esfuerzos generados durante la etapa de explotación.

De acuerdo con el estudio realizado en la mina San Joaquín, se encontró que no existía un buen levantamiento estratigráfico, geológico y geomecánico al igual que en muchas minas del país, ya que la minería actual en Colombia conlleva simplemente a la explotación en bruto del mineral, sin considerar aspectos relevantes como lo son: condiciones de esfuerzos, resistencias y presiones.

Mediante esta aproximación, se llama la atención en que la explotación minera debe llevar registros geológicos, geomecánicos y estructurales; con el fin de evitar futuros problemas, no solo de subsidencia del terreno sino también de posibles colapsos del techo y filtraciones abundantes de agua, los cuales podrían afectar de manera directa la explotación (e.g. Cordova, 2008, caso Mina Condestable; Galvis, et al; 2014).

También se pudo identificar que al realizar una obra minera, se rompe con el estado tensional de equilibrio que existía en el macizo rocoso antes de ser intervenido, por lo que el comportamiento mecánico del cuerpo geológico actuará diferente; de manera tal que los esfuerzos tensionales tanto horizontales como verticales tendrán un reacomodo en el espacio, causando posiblemente el colapso del terreno sino se cumple con el sostenimiento y los estudios pertinentes en la etapa de desarrollo y explotación. (Blanco, et al; 2000).

Las características geológicas del macizo rocoso de la mina San Joaquín comprenden un conjunto de rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Amagá, estas han pasado por procesos tectónicos y deformaciones de carácter regional, los cuales han generado que este tipo de rocas no sean tan resistentes a los esfuerzos aplicados en la

mineria actual de carbón. Areniscas de grano medio deleznales, altamente porosas, lodolitas arcillosas-arenosas competentes y lodolitas carbonosas poco resistentes abarcan litológicamente los 3 mantos de explotación actuales. El diaclasamiento en los carbones y en las rocas, forman cuñas debido a la intersección de varias familias de diaclasas como lo que se pudo observar en la figura 13A y 17A ; la orientación preferencial de los planos de diaclasamiento NW-SE, fallas secundarias de tipo inverso y normal, asociadas a los movimientos principales de las falla Piedecuesta y falla Amagá, así como el aumento en el buzamiento de los mantos de 17° a 22° , en el limite Este y Oeste del área de concesión debido al posible acercamiento a los flancos fallados del sinclinal de Amagá (Muñoz & Ordoñez 2015) Sin embargo, se pudo determinar el estilo estructural de la mina San Joaquín que se puede caracterizar por su homogeneidad, como un macizo rocoso que estructuralmente se comporta bajo un mismo régimen de esfuerzos.

La caracterización geomecánica de la mina San Joaquín, permitió comprender el comportamiento físico y mecánico del macizo rocoso, la resistencia *insitu* del carbón y su respectivo respaldo en techo y piso, con lo cual se pudo determinar la resistencia máxima de los pilares al momento de diseñar la explotación por cámaras y pilares. Se determinó un conjunto de diferentes tipos de discontinuidad, pero con un mismo patrón de dirección, composición y comportamiento los cuales permitieron clasificar el macizo rocoso de tipo III calidad media. Diaclasas en carbón y en roca, fallas, planos de estratificación y planos de laminación forman el conjunto de planos de debilidad en el macizo rocoso de la mina San Joaquín. La caída de bloques dentro de los túneles de explotación, están asociados directamente a la formación de cuñas de diaclasamiento y el comportamiento natural de los planos de debilidad que, al estar expuestos al agua, flujo de aire, polvo y uso de explosivos para la extracción del carbón, influyen negativamente en la estabilidad del macizo rocoso generando la desestabilización de este (Hoek & Brown, 1980).

De acuerdo a las caracterizaciones geológicas, estructurales y geomecánicas del macizo rocoso comprendido en el área de concesión minera de la mina San Joaquín, se logró diseñar una metodología sistemática donde se incluyera un conjunto de

condiciones necesarias para lograr una explotación segura y económicamente factible. En el artículo de Luo, 2015 en el cual se ha basado este proyecto de grado, mencionan un caso exitoso en el mundo de la minería donde Morsy & Peng (2001) diseñan un sistema de explotación de cámaras y pilares por la metodología anteriormente descrita.

1. Factor de seguridad del techo (entre 4 y 8) y del pilar (entre 1,5 y 2,0) dentro de los rangos establecidos.
2. Factor de recuperación >60% (toneladas recuperadas y extraídas)
3. Evitar, mitigar o disminuir la tasa de subsidencia superficial.
4. Aplicar la geología, la geomecánica y la geología estructural como estudios indispensables en la preparación y el desarrollo de un proyecto de explotación.

Bajo las condiciones anteriormente descritas, se pudo implementar y construir un diseño de explotación por medio del método de cámaras y pilares para 3 paneles de explotación en manto 1, 2 y 3, comprendido por zonas marginales en las cuales no se han extraído, debido a los problemas de subsidencia superficial que conllevarían al ser explotados por el método de tajo largo con derrumbe dirigido. Logrando así la obtención de un equilibrio entre la prevención de la subsidencia de la superficie y un alto coeficiente de recuperación.

10. CONCLUSIONES

El dimensionamiento de la disposición minera y especialmente de los pilares esta influenciado directamente por las condiciones geológicas, geomecánicas y estructurales del macizo rocoso.

La profundidad de explotación incide directamente en la resistencia de los pilares de producción y los pilares barrera; ya que a medida que la profundidad aumenta como en manto 1 (530 metros), las dimensiones del ancho y largo del pilar deben ser mayores con el fin de que puedan resistir los esfuerzos máximos de la columna de roca.

Al especificar un factor de seguridad suficiente para los pilares barrera y los pilares dentro del arco de presión (1,5 y 2,0), son poco probables de fallar incluso si algunos pilares fallan inesperadamente en el panel de explotación.

El movimiento de los estratos estará contenido debajo del arco de presión, para eliminar la posibilidad de subsidencia inmediata y futura. Ya que los pilares barrera soportarán la condición de carga extrema para mantener la presión dentro del arco; la cual es determinada como todo el peso de la columna de roca desde superficie hasta el panel de explotación.

El modelamiento geológico (figura 7), facilitó la comprensión de la geometría y profundidad de los mantos de la Formación Amagá, además de obtener un modelo geológico del área de concesión minera perteneciente a Carbones San Fernando, debido a que se contaba solo con registros geológicos de la literatura y de estudios aledaños. Se permitió concluir el espesor real de los 3 mantos en explotación MTO 1 (1,8 m) , MTO 2 (1,4 m) y MTO 3 (1,3 m), la profundidad a la cual se encuentran los mantos con respecto a superficie, en el cual el manto de explotación mas profundo hasta ahora es manto 1 con 530 metros verticales y finalmente la continuidad estratigráfica de los mantos donde aún no se han observado cambios o interrupciones definitivas del carbón, aunque existen fallas locales (normales e inversas) que generan desplazamientos de los mantos no mayores a los 3,0 metros.

La recolección de datos geológicos, geomecánicos y estructurales permiten identificar y caracterizar un macizo rocoso de calidad media, con un RQD promedio del 55%, orientación preferencial de estratificación 135/17°SW, 5 familias de diaclasas, conjunto de tipos de discontinuidad que influyen de manera directa la estabilidad del macizo rocoso (fallas, diaclasas, planos de estratificación y planos de laminación).

La integración de un conjunto de datos geológicos, geomecánicos y estructurales dentro de un buen diseño de explotación subterránea de carbón como es el caso, comprende la construcción ideal y equilibrada de un nuevo método de explotación, para aquellas zonas marginales que no han podido ser extraídas, buscando un alto coeficiente de recuperación y disminuyendo en su máxima instancia el fenómeno de

subsistencia superficial. La visión geológica y geomecánica que se pudo obtener por medio de la recopilación de datos dentro de la mina San Joaquín y los ensayos de compresión simple permitieron caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de las rocas presentes en los mantos de explotación, contribuyeron a la construcción final de un diseño metodológico de extracción de este carbón marginal por medio del método de cámaras y pilares.

11. REFERENCIAS

Abdellah, W. (2015). Parametric stability analysis of room and pillar method in deep coal mines. *Journal of Engineering Sciences (JES)*. University of Assiut, Faculty of Engineering, 43, 1440-1451.

Botía, D. R. G., Peñaranda, N. G., & Muñoz, J. W. J. (2015). Análisis de los factores que inciden en la desestabilización de las columnas de la catedral de sal en Zipaquirá, Cundinamarca. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 15(1), 20-38.

Bieniawski, Z T, 1976. *Rock Mass Classification in Rock Engineering*. Exploration for Rock Engineering (Ed. Z.T. Bieniawski). Balkema, Rotterdam. 97-106.

Bieniawski, Z.T, 1983. Improved design of room and pillar coal mines for U.S. conditions, Proc. 1. Int. Conf. on Stability in Underground Mines, SME-AIME, 19-51.

Bieniawski, Z T, 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York.

Cárdenas, J. I., & Restrepo, C. (2006). Patrimonio geológico y patrimonio minero de la cuenca carbonífera del suroeste antioqueño, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (18).

Cartaya-Pire, M., & Blanco-Torrens, R. (2000). Caracterización geomecánica de los macizos rocosos en minas subterráneas de la región oriental del país. *Minería & Geología*, 17(1), 66-74.

Castro Caicedo, A., 2012. Caracterización de mecánica de rocas en el panel 3 Norte Mina San Joaquín, Amagá, Medellín.

Córdova Rojas, N. D. (2008). *Geomecánica en el minado subterráneo: caso Mina Condestable*.

Flook, S. D., & Leeming, J. J. (2008). Recent developments in longwall mining entry development, and room and pillar systems. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24.

González L., 2004. *Ingeniería geológica*. P. 143-286.

Grosse, E. (1926). *El Terciario Carbonifero de Antioquia: das Kohlentertiär Antiquias*. Reimer/Vohsen.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press.

IESC, 2014. *Background review: Subsidence from coal mining activities*.

IESC, 2014. *Subsidence from longwall coal mining*.

Instituto Colombiano de Geología, & Minería. (2004). *El carbón colombiano: recursos, reservas y calidad*. Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería.

Luo, Y. (2014). *Highwall Mining: Design Methodology. Safety and Suitability*, Coal and Energy Research Bureau, 1-36.

Luo, Y. (2015). *Room-and-pillar panel design*. *Mining Engineering*, 67(7), 105-110.

Mejía, N., 1984. *Geología y geoquímica de las planchas 130 (Santafé de Antioquia) y 146 (Medellín Occidental), escala 1:100.000, memoria explicativa*. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Morsy, K. and Peng, S.S., 2001, "Mine panel failure – A case study," *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, Vol. 301, pp. 11-19.

Muñoz & Ordoñez, 2015, *Modelo geotécnico preliminar Mina San Joaquín, Carbones San Fernando, Vereda paso nivel Municipio de Amagá; Universidad Nacional de Colombia sede Medellín*.

Reed, G., Mctyer, K., & Frith, R. (2017). *An assessment of coal pillar system stability criteria based on a mechanistic evaluation of the interaction between coal pillars and the overburden*. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(1), 9-15.

Saharan, M. R., Palit, P. K., & Rao, K. R. (2012). *Desinging coal mine development galleries for room and pillar mining for continuous miner operations-Indian experience*.

Schleinig, J., Konietzky, H., 2017. *Geomechanical issues in room and pillar*

Zipf, R.K. (2015): Towards pillar design to prevent collapse of room and pillar mines, www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/tpdtp.pdf.

Sierra, G., Silva Tamayo, J., & Correa, L. (2003). Estratigrafía Secuencial de la Formación Amaga. *Boletín de Ciencia de la Tierra*, 15, 9-22.

York, G., Canbulat, I., & Jack, B. W. (2000). Coal pillar design procedures.