

DOCUMENTOS DE
TRABAJO AREANDINA
ISSN: 2665-4644

Facultad de Ingenierías y
Ciencias Básicas
Seccional Bogotá



ANÁLISIS TEÓRICO DE LAS ESTRUCTURAS ROCOSAS DE MINAS DE CARBÓN

NELLY YOLANDA CÉSPEDES-GUEVARA
ANDRÉS FELIPE RUÍZ-ORTIZ
JULIÁN ANDRÉS VALERA-MAYA

ANÁLISIS TEÓRICO DE LAS ESTRUCTURAS ROCOSAS DE MINAS DE CARBÓN

PhD. Nelly Yolanda Céspedes-Guevara

Líder Grupo de Investigación Ciencias Básicas, Facultad de Ingenierías y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, seccional Bogotá.

Correo electrónico:
ncspedes@areandina.edu.co

Andrés Felipe Ruíz-Ortiz Julián Andrés Valera-Maya

Estudiantes de VII semestre de Ingeniería de Minas, Facultad de Ingenierías y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, seccional Bogotá.

Correos electrónicos:
aruiz58@areandina.edu.co
jvalera3@areandina.edu.co

Cómo citar este documento:

Céspedes-Guevara, N. Y., Ruíz-Ortiz, A. F. y Valera-Maya, J. A. (2020). Análisis teórico de las estructuras rocosas de minas de carbón. *Documentos de Trabajo Areandina* (2). Fundación Universitaria del Área Andina. <https://doi.org/10.33132/26654644.2027>

Resumen

Los procesos de caracterización de los fenómenos naturales permiten describir las condiciones de los fenómenos físicos, por lo tanto, una clasificación de los macizos rocosos proporciona una noción de la estructura que se observa, pero no realiza una evaluación total de las condiciones mecánicas de las rocas a partir de la medición de esfuerzo, tensión y resistencia. De acuerdo con Suárez-Burgoa (2016), se puede conocer el efecto del esfuerzo y la tensión del material rocoso a través de modelaciones numéricas, mecánicas e hidráulicas, pero no se tiene establecido un modelo matemático que dé cuenta la deformación de la estructura de la roca. Este aspecto proporciona el campo de trabajo para el proyecto de investigación, ya que solamente se ha realizado un abordaje desde la caracterización geológica en el área de mecánica de rocas. Desde esta perspectiva, se pueden establecer índices de caracterización que, por medio de la medición, se pueden identificar los métodos de excavación, estabilidad de taludes y uso de la roca como material, a través de los parámetros básicos de medida. En este orden, se hace urgente para la industria de la minería encontrar un modelo teórico que le aporte mayor precisión a los parámetros mecánicos, de resistencia, deformación y esfuerzos en mina subterránea. El enfoque metodológico se fundamenta en el diseño e implementación de un modelo que permita caracterizar físicamente las estructuras rocosas a través de un modelo predictivo con un grado de confiabilidad que proporciona una identificación real de las estructuras analizadas. Desde el punto de vista metodológico, se abordó la investigación a través de una metodología mixta en donde se emplea la metodología cualitativa en la caracterización de las estructuras rocosas y la metodología cuantitativa en el análisis teórico de las mediciones realizadas.

Palabras clave: estructura geomecánica, macizo rocoso, mina subterránea, sostenimiento minero.

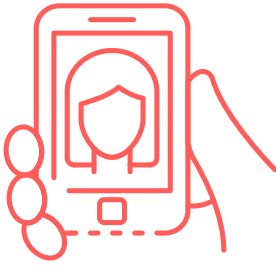
Introducción

En Colombia existe una gran variedad de minerales, esto es principalmente por los movimientos tectónicos que ocurren en este territorio. Una de las razones por las que puede ocurrir esto, es que Colombia alberga las tres cordilleras montañosas (cordillera occidental, central y oriental), ya que los movimientos de orogenia, que dan origen a estas estructuras, hacen que muchos tipos de minerales sean formados, dando como resultado una gran variedad de estos y, asimismo, una extensa gama de rocas son creadas por el resultado de la unión de estos.

La mayoría de minerales que se pueden encontrar en Colombia tienen un interés económico muy alto, por este motivo, la minería es una fuente fundamental de ingresos en este país. Por esta razón, se les son conferidos títulos mineros a aquellas empresas que hacen uso de la explotación del subsuelo, para así generar empleos en todo el país.

Entre los minerales económicamente rentables que se pueden encontrar en Colombia, algunos de los más abundantes son los hidrocarburos, más concretamente hablando del carbón que, como es de esperarse, existen muchas empresas mineras en el país, dedicadas a la explotación de este. Por este motivo, se debe realizar un estudio geomecánico de los macizos rocosos que componen estas zonas carboníferas y así poder determinar de una manera más precisa, cuál sería el comportamiento de estos, con el fin de crear un plan de sostenimiento para su correcta explotación.

Los análisis de caracterización geomecánica son estudios que, como su nombre indica, se especializan en este campo, por tal motivo, son vitales para realizar una explotación minera responsable. El más conocido es la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR, Rock Mass Rating), este método de caracterización geomecánica es muy utilizado, ya que es bastante



Como estos, existen otras alternativas para tener un monitoreo del comportamiento de los macizos rocosos, pero se sabe que muchas empresas no se interesan por este tema...

completo y fácil de aplicar, además los resultados obtenidos a partir de este son de una interpretación relativamente sencilla. Esto, unido a que los valores no solo se limitan a un simple número, también muestra varios tipos de características que aportan aún más a la estrategia que se quiera implementar en la mina, o más específicamente en su sostenimiento, siendo estas, la clase de roca, calidad de esta, así como su ángulo de cohesión y demás valores que pueden ser de utilidad en el sostenimiento pensado para la mina en cuestión.

Otro método muy utilizado es la clasificación Q, desarrollada por Barton, mayormente conocida como "Q de Barton". Es un análisis de caracterización geomecánica que ha ayudado mucho en el desarrollo de una minería sostenible en Colombia, ya que sus amplios campos de acción, hacen de este un método muy utilizado en este país, por tanto, existen una incommensurable cantidad de estudios aplicados a la minería tomando como base este.

Como estos, existen otras alternativas para tener un monitoreo del comportamiento de los macizos rocosos, pero se sabe que muchas empresas no se interesan por este tema, ya que al ser un análisis que arroja unos resultados con la toma de muestras, en un momento dado, es de esperarse que el macizo sufra cambios en su composición física y, por ende, los resultados de estos estudios también van a variar; y la mayoría de las empresas que se desarrollan en este oficio, solo realizan este estudio al comienzo de la vida explotable de una zona y no constantemente como sería lo ideal. Esto se debe a que los macizos rocosos, por los agentes exógenos a los que están expuestos, además de los movimientos tectónicos que sufre el territorio Colombiano, hacen que se sometan a continuos cambios.

Referentes teóricos

En minería, la clasificación geotécnica de los macizos rocosos se hace con el fin de definir y garantizar la viabilidad y estabilidad de la construcción del proyecto. Con el fin de estudiar el comportamiento de los macizos rocosos autores como Bieniawski (RMR), Barton (Índice Q) y Hoek & Brown (Índice GSI), clasificaron parámetros geomecánicos *in situ* cualitativos con el fin de convertirlos a cuantitativos para categorizar y evaluar las estructuras.

Método Bieniawski

En el caso del RMR de Bieniawski, se evalúan 6 parámetros que son: i) resistencia a la compresión simple (uniaxial) en roca intacta, ii) índice de calidad de la roca RQD , iii) espaciamiento de las discontinuidades (fracturas que presente el macizo en estudio), iv) estado de las discontinuidades, v) condición de aguas subterráneas y vi) orientación de las discontinuidades.

Bieniawski desarrolló el RMR en la década de 1970, siendo reformado en numerosas ocasiones, actualmente la que se usa por el momento es la de 1989; este método se basa en la suma de una serie de factores o parámetros del macizo rocoso para su clasificación geomecánica. La suma de esta caracterización corresponde a valores de cada uno de los seis parámetros y oscila entre 0 y 100, y que es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca, distinguiéndose en cinco tipos o clases de roca según el valor del RMR :

- » Clase I: $RMR > 80$ = roca muy buena.
- » Clase II: $80 < RMR < 60$ = roca buena.



- » Clase III: $60 < RMR < 40$ = roca media.
- » Clase IV: $40 < RMR < 20$ = roca mala.
- » Clase V: $RMR < 20$ = roca muy mala.

En función de la clase obtenida, se puede establecer una estimación de las características geotécnicas (ángulo y cohesión) y su comportamiento frente a excavaciones.

Barton, con su Índice Q, se convirtió en el pilar de la clasificación y caracterización geomecánicas en túneles, clasificando la calidad del macizo en 3 parámetros principales: i) tamaño del bloque (RQD/Jn), hace referencia al índice de calidad de la roca y el número de familias de diaclasas (fracturas) presentes en el bloque; ii) esfuerzo cortante inter-bloque (Jr/Ja), representa las interacciones entre rugosidad y alteración presente en la roca; iii) esfuerzo activo (Jw/SRF), consiste en la relación entre la presión de agua presente en el macizo y el esfuerzo por pérdida de carga por la excavación.

En 1964, Deere propuso un índice de calidad basado en la recuperación de núcleos de perforación comúnmente llamado Rock Quality Designation, representando el RQD, siendo definido por el porcentaje representado por la sumatoria de núcleos de perforación en longitudes enteras ≥ 100 mm dividida entre la longitud total de la perforación, el cual se calcula a partir de la expresión:

$$RQD = \frac{\text{Núcleos} \geq 100 \text{ mm}}{\text{Largo de la perforación}} * 100$$

FÓRMULA 1. ÍNDICE RQD POR RECUPERACIÓN DE TESTIGO.

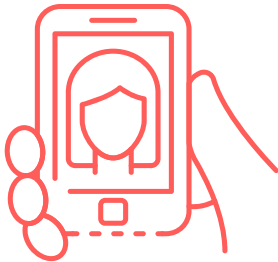
Fuente: elaboración propia.

De la aplicación de la expresión matemática relacionada anteriormente, Deere estableció el siguiente patrón de calidad del macizo rocoso representado en la tabla 1:

TABLA 1. CALIDAD DE LA ROCA SEGÚN RQD.

RQD	CALIDAD DE LA ROCA
< 25 %	Muy Mala
25 - 50 %	Mala
50 - 75 %	Regular
75 - 90 %	Buena
90 - 100 %	Excelente

Fuente: elaboración propia.



Cuando no se dispone de núcleos de perforación es posible estimar el RQD por el número de fisuras contenidas, en un bloque de 1 metro cúbico, realizando una suma de cada sistema de juntas, sin arcilla, usando este parámetro:

Donde J_v : Cantidad total de juntas por metro cúbico.

$$RQD = 115 - 3.3(J_v)$$

FÓRMULA 2. ÍNDICE RQD POR CANTIDAD DE JUNTAS.

Fuente: elaboración propia.

Método GSI Hoek & Brown

El método de Hoek & Brown o GSI es el índice de resistencia geológica, desarrollado por Hoek en 1994. Este se creó con el fin de subsanar los fallos encontrados en el análisis geomecánico de Bieniawski (RMR), ya que hace una evaluación más amplia de la resistencia de los macizos rocosos. Este índice de calidad geomecánica toma como base dos criterios para determinar la deformidad y la resistencia de los macizos rocosos, estos son: i) el RMS , que es la estructura del macizo rocoso, determinada en blocosidad y grado de trabazón; y ii) el J_c , el cual es la condición de las estructuras presentes en el macizo rocoso en cuestión.

Para calcular el g_{SI} , se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$\sigma_{1,ef} = \sigma_{3,ef} + \sigma_c \left(\frac{(m_b)(\sigma_{3,ef})}{\sigma_c} + s \right)^a$$

FÓRMULA 3. ÍNDICE g_{SI} .

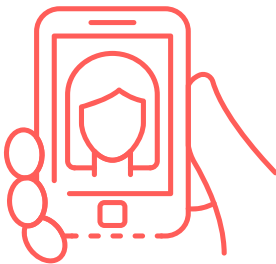
Fuente: elaboración propia.

Donde:

- » $\sigma_{1,ef}$ Tensión principal mayor durante el fallo de roca.
- » $\sigma_{3,ef}$ Tensión principal menor durante el fallo de roca.
- » σ_c Fuerza de la roca intacta en compresión simple.
- » σ_{ci} Resistencia a la compresión uniaxial de piezas intactas de roca.
- » m_{bs} Constante de material no lineal dependiendo de la calidad de la roca.
- » α Coeficiente en función de la ruptura de la roca.

Dependiendo del resultado del g_{SI} , se determina la calidad del macizo, siendo los siguientes parámetros los utilizados para darle una categoría a el mismo:

- » Clase I: g_{SI} 80 – 100, macizos de calidad Muy Buena.
- » Clase II: g_{SI} 60 – 80, macizos de calidad Buena.
- » Clase III: g_{SI} 40 – 60, macizos de calidad Regular.
- » Clase IV: g_{SI} 20 – 40, macizos de calidad Mala.
- » Clase V: g_{SI} 0 – 20, macizos de calidad Muy Mala.



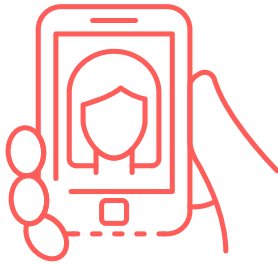
Metodología

La metodología de este proyecto es cualitativa, en su primera fase, con el fin de orientar la investigación a un análisis de la información y datos de estudios previamente hechos, acerca del carbón en Colombia. En la siguiente fase, se une la parte cuantitativa, con el fin de obtener resultados comparativos con base a los patrones de medidas calculados a partir del índice de Barton y el coeficiente RMR , el cual evidencia inicialmente una pesquisa bibliográfica sobre el análisis geomecánico de las estructuras rocosas, seguido de una formulación teórica de los cálculos del índice RMR (Rock Mass Rating) que permiten establecer la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso.

Para esta investigación se tomaron en cuenta estudios previamente hechos, para tener una visión más amplia de este campo, tal como el estudio *El carbón. Muestreo, análisis y clasificación de recursos y reservas*, realizado por Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), en el 2010, el cual es una actualización de un estudio hecho con el fin de dar una clasificación a los yacimientos presentes en Colombia. Este da a conocer en detalles aspectos relacionados con las normas y procedimientos para el muestreo y análisis, tipos de muestreo, clases de análisis, el sistema de clasificación de recursos y reservas de carbón. Esto permite identificar que el enfoque del proyecto de investigación sea exploratorio y descriptivo para dar cuenta de los hallazgos encontrados en el trabajo de campo y en la caracterización a través de la modelación matemática.

Resultados

Una vez analizados los datos mediante el índice RMR de Bieniawski y índice el Q de Barton, estos arrojan calidades



bajas del macizo rocoso, lo que principalmente indica que pudieron ser afectados por factores exógenos. Ambos métodos utilizan factores establecidos, lo cual permite entrever que el estudio sea llevado a cabo con información precisa y concreta. Para el caso del RMR y Q de Barton el sostenimiento establecido está descrito por:

Estación geomecánica 1

Avance a sección completa de 1 a 1,5 metros con un soporte a 20 m, con anclaje local en las bóvedas de 2 a 3 metros de largo y espaciado a 2 metros con malla electrosoldada ocasional y 5 centímetros de concreto lanzado para impermeabilizar.

El Q de Barton nos da un parámetro de sostenimiento con pernos a distancia de 1,5 a 2 metros y con un concreto lanzado de espesor de 40 milímetros, teniendo una calidad de roca regular.

Estación geomecánica 2 y Estación geomecánica 3

Avance y desabombe de 1,5 a 3 metros con sostenimiento completo, anclado sistemático en bóvedas con tablas de 3 metros con espaciado entre ellas de 1,5 a 2 metros con malla de techo y de 5 a 10 centímetros de concreto lanzado para impermeabilización.

Sostenimiento pernado con espaciado de 1,3 a 1,5 metros, con longitud de 1,5 a 2,4 metros y 40 milímetros de concreto lanzado, con una calidad de roca mala.

Estos estándares establecidos permiten estimar sostenimientos para excavaciones subterráneas, ampliando las posibilidades dependiendo del macizo que se tenga en el avance de una mina. Se debe tener en cuenta que estos factores no son definitivos y siempre están expuestos a cambios por afectaciones estructurales que no pudieron ser identificadas o

En este sentido, el aporte al conocimiento que se genera en esta investigación se encuentra centrado desde la conceptualización de los escenarios de la construcción de modelos...

por infiltraciones de aguas subterráneas, lo que generaría cambios de sostenimiento y de planeamiento.

En este sentido, el aporte al conocimiento que se genera en esta investigación se encuentra centrado desde la conceptualización de los escenarios de la construcción de modelos, ya que, de acuerdo con Hurtado (2006), la formulación de un modelo en ingeniería comprende un análisis apropiado de los datos que permita explicar el comportamiento de la información obtenida y, a su vez, evidencie los elementos de conocimiento propios de la disciplina.

El modelo teórico que se evidencia en el transcurso de la investigación proporciona una metodología de medición de la calidad y sus índices RMR que muestran la comprensión y la resistencia del macizo rocoso a diferentes factores exógenos y endógenos de la estructura en el macizo.

Conclusiones

El proceso de trabajo realizado en la puesta en marcha del proyecto de investigación permite encontrar que, la formulación de metodologías de medición teórica de la calidad del macizo rocoso es un factor de suma importancia para la comunidad aledaña a los proyectos mineros, ya que un modelo sólido de medición le proporciona a la mina unos índices de calidad del macizo y, a su vez, un esquema de seguridad adicional para el personal minero y la comunidad.

Desde los aspectos teóricos, la modelación con los índices RMR, GSI y Q de Barton establecen los escenarios de trabajo en estudios geomecánicos desde la pesquisa bibliográfica, sin realizar una intervención *in situ*, lo que muestra que los desarrollos y estudios en áreas como mecánica de



rocas, geología estructural y demás estudios de suelos pueden llevarse a cabo si se tiene la documentación y los análisis matemáticos de la región que se desea investigar.

Cabe aclarar que, esta investigación se desarrolló durante el 2020, año en el cual el mundo estaba atravesando la emergencia sanitaria provocada por el COVID-19, por tal razón, no se realizó algún trabajo de campo, siendo esta una oportunidad para validar los conocimientos teóricos en la disciplina de estudio y, al mismo tiempo, la posibilidad de plantear una segunda fase que permita corroborar con el trabajo de campo los resultados ya obtenidos.

Referencias

- Becerra Ramírez, A. F. y Castillo Riapira, E. Y. (2017). *Estudio geomecánico para las minas Esperanza y Zarzal pertenecientes a la Concesión Minera FIU-151, municipio de Gámeza, Boyacá* [trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2236>
- Calderón Carrillo, Z (2018). *Introducción a la mecánica de rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo*. Editorial UIS.
- Cook, N. G. W. (2009). La falla de la roca. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (26), 87-107. <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n26/n26a09.pdf>
- Duarte Barrera, C. I. y Monroy, W. O. (2012, abril). *Exploración gas metano asociado al carbón. Área Checua-Lenguazaque. Sector GMAC Boquerón de Tausa-La Pluma, Cucunubá*. Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano. <https://bit.ly/3An0GYT>
- Figuroa Madero, N. P., Mendoza Ortiz, S. P., Ríos Reyes, C. A., & Castellanos Alarcón, O. M. (2014). Characterization and testing of rock aggregates of the Santa Marta Batholith, (Colombia). *Revista ION*, 27(2), 87-104. <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v27n2/v27n2a08.pdf>
- Fuquen, J. A. y Osorno, J. F. (2005, febrero). *Geología de la plancha 190 Chiquinquirá*. Ministerio de Minas y Energía; Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). <https://bit.ly/3QLv6sO>

- Galvis Carreño, L. V., Ochoa, C. A., Arguello Fuentes, H., Carvajal Jiménez, J. M. y Calderón Carrillo, Z. (2011). Estimación de propiedades mecánicas de roca utilizando inteligencia artificial. *Ingeniería y Ciencia*, 7(14), 83-103. <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v7n14/v7n14a05.pdf>
- Gil-Pérez, D. (1996) New trends in science education. *International Journal of Science Education*, 18(8), 889-901. <https://doi.org/10.1080/0950069960180802>
- Guba, E. G., & Lincoln, Y. S. (1994). Competing paradigms in qualitative research. En N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (eds.), *Handbook of qualitative research* (pp. 105-117). Sage Publications.
- Hurtado, L. L. (2006). Modelamiento teórico y modelamiento empírico de procesos, una síntesis. *Scientia et Technica*, 12(31), 103-108. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4829387.pdf>
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). (2010). *El carbón. Muestreo, análisis y clasificación de recursos y reservas* (2.ª ed.). Ingeominas. <https://bit.ly/3bVHckC>
- Ministerio de Educación y Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Marco Nacional de Cualificaciones de Colombia. Sector minero minerales, oro y carbón*. Mineducación; Minminas. https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-362826_recurso.pdf
- Pérez Matos, N. E. y Setién Quesada, E. (2008). La interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad en las ciencias. Una mirada a la teoría bibliológico-informativa. *Acimed*, 18(4), 1-19. <http://scielo.sld.cu/pdf/aci/v18n4/aci31008.pdf>
- Ríos-Soberanis, C. R., Ley-Paredes, V. J., Pérez Pacheco, E., Vinajera Reyna, C. E., Wakayama, S., & Sakai, T. (2019). Experimental studies on the mechanical behavior of Mayan archeological rocks. *DYNA*, 86(208), 227-233. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73581>
- Suárez-Burgoa, L. O. (2016). *Mecánica del macizo rocoso. Introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea*. <https://bit.ly/3QnqhXd>
- Ulloa, C. E. y Rodríguez, E. (1979, julio). *Geología de las planchas 170, Vélez, 190 Chiquinquirá, Colombia*. Ministerio de Minas y Energía; Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas).

