

Caracterización petrofísica y mecánica de los paquetes litológicos a partir del análisis de registros geofísicos y pozos corazonados, Cerrejón (Colombia)

Petrophysical and mechanical characterization of lithological packages from the analysis of geophysical records and core wells, Cerrejon (Colombia)

Melida Helena Cobo-Pérez¹; Diana Isabel Guirales-Puerta²; Dino Carmelo Manco-Jaraba^{3*}

¹Fundación Universitaria del Área Andina _ Valledupar _ Colombia _ Contacto: mcobo2@estudiantes.areandina.edu.co

²Fundación Universitaria del Área Andina _ Valledupar _ Colombia _ Contacto: diana.isabel.guirales@gmail.com

³Ingeniero de Minas, M. Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Universidad de La Guajira. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>.

Cite this article as: M. H. Cobo-Perez, D. I. Guirales-Puerta, D. C. Manco-Jaraba “Caracterización petrofísica y mecánica de los paquetes litológicos a partir del análisis de registros geofísicos y pozos corazonados, Cerrejón (Colombia)”, Prospectiva, Vol. 22 N° 2 2024.

Recibido: 04/07/2023 / Aceptado: 01/04/2024

<http://doi.org/10.15665/rp.v22i2.3297>

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es caracterizar petrofísica y mecánicamente los paquetes litológicos a partir del análisis de registros geofísicos y pozos corazonados, Cerrejón (Colombia). La metodología empleada cuenta con varias fases, primero con una revisión del estado del arte en bases de datos académicas y científicas. Posteriormente, fases de campo para toma de registros de tres (3) pozos corridos en formato LAS (profundidades estimadas, ubicación y parámetros o datos en el encabezado de los registros originales), toma de doce (12) muestras a corazonadas (núcleos) y características generales. Además, se realizaron análisis de porosidad, humedad, densidad, elasticidad y compresión a partir de la resistencia a compresión simple y su efecto en las voladuras, función de la dureza y velocidad sísmica. Concluyéndose que, los paquetes litológicos de la formación clasificados como areniscas de grano fino-medio a lodosas con intercalaciones plana paralelas a onduladas (D1, D7, D9 y D11) y lodolitas de grano fino a arenosas con alta cantidad de materia carbonosa (D2, D3, D4, D5, D6, D8 y D10), presentan densidades promedio de 2,40 g/cm³.

Palabras clave: Cerrejón; Litología; Pozos corazonados; Registros geofísicos.

ABSTRACT

The objective of this research is to characterize petrophysically and mechanically the lithological packages from the analysis of geophysical logs and core wells, Cerrejón (Colombia). The methodology used has several phases, first with a review of the state of the art in academic and scientific databases. Subsequently, field phases for recording three (3) wells in the LAS format (estimated depths, location and parameters or data in the header of the original records), taking twelve (12) hunch samples (cores) and general characteristics. In addition, analyzes of porosity, humidity, density, elasticity and compression were carried out based on the resistance to simple compression and its effect on blasting, as a function of hardness and seismic velocity. It was concluded that, the lithological packages of the formation classified as fine-medium to muddy grained sandstones with flat parallel to wavy intercalations (D1, D7, D9 and D11) and fine-grained to sandy mudstones with a high amount of carbonaceous matter (D2, D3, D4, D5, D6, D8 and D10), present average densities of 2.40 g/cm³.

Keywords: Cerrejon; Lithology; Cored wells; Geophysical loggings.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la minería de carbón a cielo abierto requiere de labores iniciales y herramientas para localizar, interpretar y evaluar tanto geológica como económicamente áreas de interés. Los registros geofísicos son instrumentos útiles que contribuyen en la obtención de información petrofísica y estructural mediante procesamiento de datos a partir de pozos exploratorios, determinación de las variaciones laterales de las rocas e identificación de estructuras geológicas que influyen dentro del proceso de explotación. Según [1], es un conjunto de técnicas que investiga el interior de la tierra a partir de variaciones detectadas con parámetros (físicos significativos) gravimétricos (densidad), eléctricos (resistividad), sísmicos (velocidad de propagación de ondas sísmicas) y radiactivos (niveles de radiación natural o inducida); permitiendo conocer a través de los registros obtenidos las características de las capas que atraviesa el sondeo [2] y litología de la formación de interés [3].

La mina Cerrejón (Tajo Annex) está desarrollando proyectos que permiten el modelamiento del material estéril y reconocimiento del área. Esta investigación tiene como objetivo caracterizar petrofísica y mecánicamente los paquetes litológicos a partir del análisis de registros geofísicos y pozos corazonados, Cerrejón (Colombia).

2. LOCALIZACIÓN

La mina Cerrejón, está ubicada en la costa norte colombiana, departamento de La Guajira, al este de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) y oeste de la Serranía del Perijá (SP). El área de estudio corresponde al tajo Annex, jurisdicción del municipio de Barrancas, localizado en la zona norte de la Serranía del Perijá hacia el Valle Medio del Río Ranchería (Figura 1).

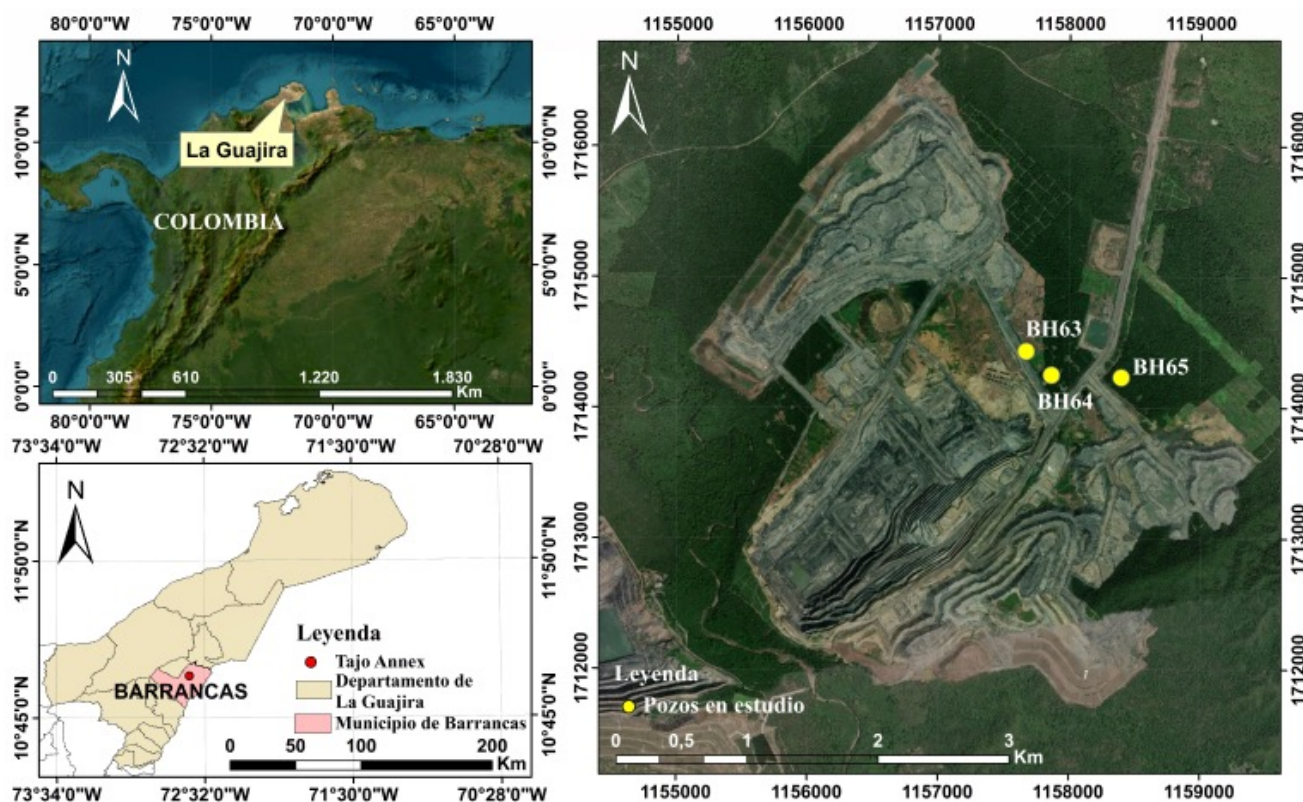


Figura 1. Localización del área de investigación.

Figure 1. Location of the research area.

Fuente: Autores. Source: Authors.

3. METODOLOGÍA

Inicialmente se realizó revisión del estado del arte en bases de datos académicas, científicas e información brindada por la mina Cerrejón. Posteriormente, fases de campo para toma de registros de tres (3) pozos corridos en formato LAS (profundidades estimadas, ubicación y parámetros o datos en el encabezado de los registros originales) (Figura 1), toma de dieciocho (18) muestras (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D17 y D18) corazonadas (núcleos) y características generales. Los registros se analizaron a través del software Display Century permitiendo obtener las curvas de Densidad, Gamma Ray y Resistividad [4], para determinar las variaciones litológicas. Además, se procesó la información del registro sísmico a través del software WellCad, el cual permitió identificar las propiedades mecánicas a partir de las velocidades de onda P y S.

Se realizaron análisis de densidad (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11 y D12), porosidad (D1, D7, D9, D10 y D12, humedad (D1, D7, D9, D10 y D12) [5] (Ecuación 1-3), propiedades elásticas y mecánicas de las rocas (D13, D14, D15, D16, D17 y D18), módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν) (D13, D14, D15, D16, D17 y D18) (Ecuación 4-5), velocidad de propagación de las ondas (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12), estimación de la resistencia (D13, D14, D15, D16, D17 y D18) [6] y dureza a partir de la resistencia a compresión simple y su efecto en las voladuras [7], [8]. Para determinar las propiedades físicas, se tuvieron en cuenta datos medidos en estado natural (M), seco (M_o) y saturado (M_s) con el método de Arquímedes [9], midiendo el agua desplazada por los poros rellenos de fluido, y donde M_{sum} representa el peso de la muestra seca menos el empuje hidrostático.

En la ecuación 1 se define la densidad de la roca seca;

$$\rho_d = \frac{M_o}{M_s - M_h} * \rho_{agua} \quad (1)$$

En la ecuación 2 se tiene porosidad abierta;

$$n_o = \frac{M_s - M_o}{M_s - M_h} * 100 \quad (2)$$

El contenido de agua en saturación se expresa en la ecuación 3;

$$W_s = \frac{M_s - M_w}{M_o} * 100 \quad (3)$$

Solo para las muestras D1, D7, D9, D10 y D12 se pudo obtener el peso saturado, resistiendo 24 horas sumergidas. Además, se observa que muestras como D2, D3 y D4 tienen los menores valores para los 3 parámetros.

Asimismo, la relación entre los esfuerzos aplicados y deformaciones producidas determinaron las propiedades mecánicas, representadas por el módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν). El Módulo de Young se calculó dividiendo el esfuerzo por la elongación unitaria; F representa la fuerza axial aplicada, A_0 área de sección transversal original, L_0 altura original y ΔL variación de dimensión longitudinal del objeto (Ecuación 4) [10]; y coeficiente de Poisson la relación entre la deformación transversal (ϵ_{lat}) y axial (ϵ_{long}) (Ecuación 5) [11].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F}{A_0} \frac{L_0}{\Delta L} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (5)$$

Además, se analizó estadísticamente empleando Excel, datos de registro de pozos (archivo LAS) filtrando los valores representativos de cada paquete de roca mediante los registros Density [4] y Sonic [12], promediando los datos medidos por la sonda cada 0,005 metros, teniendo en cuenta cada una de las densidades en los registros (Densidad de espacio largo, corto y compensada), velocidades de ondas V_p/V_s , módulos de Young y coeficiente de Poisson calculados por WellCad.

Se prepararon [13] seis (6) núcleos y se le realizaron ensayos de compresión uniaxial [14] y 12 núcleos ensayos de densidad, porosidad y contenido de humedad de las rocas [5]. Por último, se compararon los datos de registro y análisis de laboratorio con los resultados de registro de núcleo para considerar el balance o porcentaje de error y establecer si es pertinente la información obtenida del procesamiento de registros sínicos con el software WellCad.

4. GEOLOGÍA

Según [15], el tajo Annex se encuentra constituido por las unidades de la Formación Cerrejón, Formación Tabaco y Depósitos Cuaternarios.

Formación Cerrejón (E1c)

Se describe como una secuencia de areniscas feldespáticas y líticas, interestratificadas con lutitas carbonosas y mantos de carbón de gran espesor, las cuales indican ciclos de sedimentación más o menos homogéneos dentro de una cuenca trasarco de alta subsidencia y que gradan hacia la base a cuarzoarenitas y subarcosas [16]. Los diferentes ambientes de sedimentación propuestos para la formación Cerrejón en el Paleoceno superior son: un delta progradante con sus facies subacuosas y subareales gradando a ambientes continentales, un ambiente de llanuras de marea cronológica y geográficamente afectados por variaciones en el nivel del mar, y un ambiente submareales por la acumulación en el frente de una plata-forma continental con aporte de sedimentos finos, cruzados por canales submareales en la parte superior [16]–[18].

Formación Tabaco (E2t)

Corresponde a una secuencia clástica continental compuesta de cuarzoarenitas líticas, areniscas conglomeráticas y conglomerados claros con abundantes fragmentos de chert y cuarzo lechoso que se disponen en paquetes de gran espesor [19], [20]. Hacia la base el cemento y la matriz de las areniscas y los conglomerados es más calcáreo que hacia la parte superior.

Depósitos recientes (Qal)

Corresponden a sedimentos recientes acumulados por las corrientes en la zona plana y semi-plana. Su expresión morfológica es una superficie horizontal (plana) donde sus componentes son observables en los cortes de ríos y quebradas [21] departamento del Cesar, afloran secuencias estratigráficas de rocas sedimentarias carbonatadas con delgadas intercalaciones de shales y venillas de calcitas pertenecientes al grupo Cogollo. Con la finalidad de conocer la composición mineralógica de las calizas aflorantes, las condiciones paleoambientales y su uso industrial, se procedió a un estudio de geología de superficie, que consistió en la descripción litoestratigráficas de las rocas aflorantes, apiques y toma de muestras in situ. En total se recolectaron 6 muestras (LP-1, LP-2, LP-3, LP-4, LP-5, LP-6).

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Falla Cerrejón

La Falla Cerrejón tiene una traza sinuosa sobre el terreno, y sigue los contornos topográficos debido a su bajo ángulo de buzamiento; bordea el lado oriental del valle del Cesar - Ranchería y limita éste con la serranía de Perijá [22].

La falla se extiende desde la Falla Oca al norte y continúa al sur en el Departamento del Cesar. Es una falla de cabalgamiento de bajo ángulo, con buzamiento de $15^\circ \pm 10^\circ$ hacia el SE y un desplazamiento mínimo de $1,7 \pm 0,6$ km en la vertical y $7,8 \pm 2$ km en la horizontal [23].

Falla Ranchería

[24] describen en el valle del río Ranchería esta estructura, con una extensión aproximadamente por 22 km, entre el arroyo Conejo y un poco al sur de Roche, pero posiblemente tiene continuidad hacia el sur en el Departamento del Cesar. La falla se encuentra parcialmente cubierta, tiene dirección NE y constituye el límite sureste de la Sierra Nevada de Santa Marta. Sobre el tipo de movimiento e inclinación del plano de falla no se tiene información.

Las líneas sísmicas realizadas en la zona muestran la Falla Ranchería en sección trasversal como un pliegue sinclinal cuyo flanco sur buza fuertemente al norte (45°-50°) en comparación con el flanco norte que tiene un buzamiento suave (10°-20° al Sur). La observación de las trazas de los mantos de carbón a diferentes niveles de minería dentro de toda la concesión del Cerrejón muestra que la Falla Ranchería tiene un desplazamiento horizontal aproximado de 6.3km.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Propiedades petrofísicas de las rocas

La geología del área del Tajo Annex, está constituida por un conjunto de rocas sedimentarias, donde, D1, D7, D9 y D11 están representadas por areniscas de grano fino-medio a lodosas con intercalaciones plana paralelas a ondulosas, y D2, D3, D4, D5, D6, D8 y D10 lodolitas de grano fino a arenosas con alta cantidad de materia carbonosa (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de las muestras corazonadas.

Código de pozo	Muestra	Litofacies	Profundidad (m)	Descripción
BH63	D1	AL D	149,302 - 168,380	Arenisca [25] de color 10G 6/2 pale green [26] de tamaño fino a medio, calcárea, con laminación plana paralela [27] y fracturas abiertas rellenas de calcita intercalada con Lodolita [25] de color 10G 4/2 Grayish green. Presenta materia carbonosa y moscovita.
BH63	D2	AL C	81,911 - 136,072	Lodolita arenosa [25] masiva de color 10G 6/2 pale green [26] de tamaño fino masiva. Presenta materia carbonosa.
BH63	D3	AL A	44,498 - 81,911	Lodolita [25] carbonosa, masiva, de color 10G 4/2 Grayish green [26] grano de tamaño fino.
BH64	D4	AL A	166,900 – 209,905	Lodolita [25] carbonosa, de color 10G 4/2 Grayish green [26] de tamaño fino, con laminación plana paralela [27].
BH64	D5	AL A	166,900 – 209,905	Lodolita [25] carbonosa de color 10G 4/2 Grayish green (Munsell, 2009) grano de tamaño muy fino, masiva.
BH64	D6	AL C	115,182 – 154,011	Lodolita [25] de color 10G 6/2 pale green [26] de grano fino con laminación plano-paralela [27] intercalada con capas de arenas. Presenta abundante moscovita y materia carbonosa.
BH64	D7	AL D	81,148 – 109,182	Arenisca lodosa [25] de color 10G 6/2 pale green [26] de grano fino, laminación ondulosa [27] intercalada con capas de materia carbonosa. Presenta abundante moscovita, fracturas cerradas y buzamiento de 50°.
BH64	D8	AL A	27,300 – 38,100	Lodolita (Folk, 1974) masiva, de color 10G 4/2 Grayish green (Munsell, 2009) y grano fino. Presencia de materia carbonosa y pirita.
BH65	D9	AL E	176,54 – 182,48	Arenisca [25] masiva, de color 10G 6/2 pale green [26] grano de tamaño medio. Presenta materia carbonosa.

BH65	D10	AL C	176,54 – 182,48	Lodolita arenosa [25] de color 10G 6/2 pale green [26] de grano fino a medio con laminación ondulosa no paralela [27] intercaladas con pequeñas capas de areniscas.
BH65	D11	AL D	143,03 – 173,477	Arenisca lodosa [25] de color 10G 6/2 pale green [26], grano de tamaño fino, con laminación ondulosa [27] intercalada con capas de materia carbonosa, presenta buzamiento de 50°.
BH65	D12	AL A	37,563 – 55,50	Lodolita [25] masiva, de color 10G 4/2 Grayish green [26], grano de tamaño fino, con presencia de materia carbonosa.

Fuente: Autores.

Al aplicar el método de Arquímedes en las muestras D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11 y D12 se obtuvieron valores promedios de masa en estado natural, seco, saturado y sumergido de 424gr, 416gr, 466gr y 176gr respectivamente, independientemente de la profundidad a la que se encontraban (Tabla 2).

Tabla 2. Datos experimentales para análisis de propiedades.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	M (gr)	Mo (gr)	Ms (gr)	Msum (gr)
BH63	D1	149,302 - 168,380	483	482	491	195
BH63	D2	81,911 - 136,072	392	387	-	155
BH63	D3	44,498 - 81,911	334	330	-	141
BH64	D4	166,900 – 209,905	399	387	-	163
BH64	D5	166,900 – 209,905	410	399	-	174
BH64	D6	115,182 – 154,011	444	421	-	169
BH64	D7	81,148 – 109,182	420	419	446	191
BH64	D8	27,300 – 38,100	411	405	-	178
BH65	D9	176,54 – 182,48	478	471	493	215
BH65	D10	176,54 – 182,48	444	444	460	184
BH65	D11	143,03 – 173,477	448	442	-	155
BH65	D12	37,563 – 55,50	420	415	441	191

*Msum representa el peso de la muestra seca menos el empuje hidrostático. Fuente: Autores.

5.2 Densidad

La densidad promedio tanto para valores de registro como de ensayo 2,40 g/cm³. La muestra D11 presenta valores irregulares con porcentaje de error superior al 10% debido al proceso de determinación como alterabilidad (meteorización), por lo que es poco confiable y no se tendrá en cuenta (Tabla 3).

Además, teniendo en cuenta la dispersión relativa al comparar la variabilidad de los dos conjuntos de datos, se observa que las muestras D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11 y D12 tienen una mayor variabilidad en la densidad para los valores de ensayo con un 4,8% mientras que para registro 2,9% (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de densidad obtenidos del análisis.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Valores de ensayo (g/cm ³)	Valores de registro (g/cm ³)	Error (%)
BH63	D1	149,302 – 168,380	2,47	2,45	1
BH63	D2	81,911 – 136,072	2,5	2,44	2
BH63	D3	44,498 – 81,911	2,34	2,45	4
BH64	D4	166,900 – 209,905	2,37	2,24	6
BH64	D5	166,900 – 209,905	2,29	2,35	2
BH64	D6	115,182 – 154,011	2,49	2,45	2
BH64	D7	81,148 – 109,182	2,23	2,44	9
BH64	D8	27,300 – 38,100	2,28	2,42	6
BH65	D9	176,54 – 182,48	2,23	2,44	8
BH65	D10	176,54 – 182,48	2,41	2,44	1
BH65	D11	143,03 – 173,477	2,85	2,36	21
BH65	D12	37,563 – 55,50	2,17	2,32	6

Fuente: Autores.

5.3 Porosidad

Las muestras D1, D7, D9, D10 y D11 presentaron valores entre 23,60 y 42,50% y el promedio para los cálculos derivados del análisis del laboratorio y registro fueron 29,60 y 32,84%. La muestra D12 presenta valores diferentes indicando poca confiabilidad en los resultados, por lo que no se tiene en cuenta (Tabla 4).

Las muestras D1, D7, D9, D10 y D12 tienen una mayor variabilidad en el porcentaje de porosidad total para los valores de ensayo con un 16,42% mientras que los de registro presentan 5,32% (Tabla 4).

Tabla 4. Valores de porosidad obtenidos del análisis.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Valores de ensayo (%)	Valores de registro (%)	Error (%)
BH63	D1	149,302 - 168,380	34,12	34	0
BH64	D7	81,148 – 109,182	26,61	31	14
BH65	D9	176,54 – 182,48	24,35	31,74	23
BH65	D10	176,54 – 182,48	33,33	34,63	4
BH65	D12	37,563 – 55,50	23,6	42,5	44

Fuente: Autores.

5.4 Contenido de humedad

La media aritmética presenta valor de 0,8% para el contenido de humedad, variando entre 0 - 1,9% y promedio 4,8% para la absorción. La muestra D9 presenta alto contenido de humedad mientras que la muestra D10 prácticamente nulo (Tabla 5). La muestra D7 presenta alto porcentaje de absorción con un 7,0%, teniendo en cuenta el estado seco inicial y el saturado final y D1 el menor valor de adsorción con 1,9% (Tabla 5).

Tabla 5. Contenido de humedad y absorción.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	W (%)	Absorción (%)
BH63	D1	149,302 - 168,380	0,2	1,9
BH64	D7	81,148 – 109,182	0,7	7
BH65	D9	176,54 – 182,48	1,9	5,1
BH65	D10	176,54 – 182,48	0	3,6
BH65	D12	37,563 – 55,50	1,2	6,3

Fuente: Autores.

5.5 Propiedades elásticas y mecánicas de las rocas

A partir del ensayo de resistencia a la compresión simple se determinó que las muestras D13, D17 y D18 presentaron mayor resistencia (9,43 MPa) requiriendo la aplicación de fuerzas alrededor de los 26,676 kN. Mientras que las muestras D14, D15 y D16 presentaron menor resistencia con un valor de 5,22 MPa, respuesta de fuerzas cercanas a los 14,923 kN (Tabla 6).

Tabla 6. Datos experimentales para análisis de propiedades mecánicas.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	h inicial (cm)	h final (cm)
BH63	D13	149,302 - 168,380	24700	8,74	12,9	12,6
BH63	D14	44,498 - 81,911	17270	6,09	12,3	12
BH64	D15	166,900 - 209,905	14000	4,81	12,5	12
BH64	D16	115,182 - 154,011	13500	4,77	12,6	12,4
BH64	D17	81,148 - 109,182	25340	8,96	12,3	12,1
BH65	D18	143,030 - 173,477	29990	10,61	13	12,6

Fuente: Autores.

Las litologías sedimentarias ensayadas se clasifican principalmente como areniscas de grano fino-medio a lodosas con intercalaciones plana paralelas a ondulosas en el caso de D13 y D18. Mientras que, D14, D15, D16 y D17 son descritas como lodolitas de grano fino con gran presencia de materia carbonosa; esta última con un porcentaje importante de arenas (Tabla 7).

Tabla 7. Descripción de las muestras corazonadas sometidas a compresión simple.

Código de pozo	Muestra	Litofacies	Profundidad (m)	Descripción
BH63	D13	AL D	149,302 - 168,380	Arenisca [25] de color 10G 6/2 pale green [26] de tamaño fino a medio, calcárea, con laminación plana paralela [27] y fracturas abiertas rellenas de calcita intercalada con Lodolita [25] de color 10G 4/2 Grayish green. Presenta materia carbonosa y moscovita.
BH63	D14	AL A	44,498 - 81,911	Lodolita [25] carbonosa de color 10G 4/2 Grayish green [26] de tamaño fino, masiva.
BH64	D15	AL A	166,900 - 209,905	Lodolita [25] carbonosa de color 10G 4/2 Grayish green [26] de tamaño fino, con laminación plana paralela [27]
BH64	D16	AL A	115,182 - 154,011	Lodolita [25] carbonosa de color 10G 4/2 Grayish green [26] grano de tamaño muy fino, masiva.
BH64	D17	AL C	81,148 - 109,182	Lodolita [25] de color 10G 6/2 pale green [26] de grano fino con laminación plano-paralela [27] intercalada con delgadas capas de arenisca. Presenta abundante moscovita y materia carbonosa.
BH65	D18	AL D	143,030 - 173,477	Arenisca lodosa [25] de color 10G 6/2 pale green [26] de grano fino, con laminación ondulosa [27] intercalada con capas de materia carbonosa.

Fuente: Autores.

5.6 Módulo de Young (E) y Coeficiente de Poisson (ν)

La resistencia a la compresión está definida por la relación tensión/deformación, para la variación en el módulo de Young las muestras comprenden valores entre 12379 y 57035 MPa (Tabla 8); la muestra D15 presenta resultados irregulares poco confiables, por lo que no se tiene en cuenta. La media aritmética para los valores de muestras admisibles derivadas del análisis de laboratorio y de registro son 36455 y 47194 MPa respectivamente (Tabla 8).

Teniendo en cuenta la dispersión relativa, para el conjunto de datos, se observa que las muestras tienen una mayor variabilidad en el módulo de Young para los valores de ensayo con un 31,4% mientras que para registro tan solo presenta 19,2% (Tabla 8).

Tabla 8. Valores de módulo de Young obtenidos del análisis.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Valores de ensayo (MPa)	Valores de registro (MPa)	Error (%)
BH63	D13	149,302 - 168,380	37564	46650	19
BH63	D14	44,498 - 81,911	25043	45509	45
BH64	D15	166,900 - 209,905	12379	28666	57
BH64	D16	115,182 - 154,011	30080	33437	10
BH64	D17	81,148 - 109,182	55117	53338	3
BH65	D18	143,030 - 173,477	34472	57035	40

Fuente: Autores.

El Coeficiente de Poisson de las muestras D13, D14, D15, D16, D17 y D18 presentaron valores entre 0,2 y 0,5 (Tabla 9); media aritmética correspondiente a los análisis de laboratorio y de registro de 0,4 y 0,2; y mayor variabilidad del coeficiente para valores de 28,0% de registro y 19,4% para ensayo de laboratorio.

Tabla 9. Valores de coeficiente de Poisson obtenidos del análisis.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Valores de ensayo	Valores de registro
BH63	D13	149,302 - 168,380	0,3	0,2
BH63	D14	44,498 - 81,911	0,3	0,2
BH64	D15	166,900 - 209,905	0,4	0,2
BH64	D16	115,182 - 154,011	0,5	0,2
BH64	D17	81,148 - 109,182	0,5	0,2
BH65	D18	143,030 - 173,477	0,5	0,3

Fuente: Autores.

5.7 Velocidad de propagación de las ondas

Las muestras D4 y D6 fueron tomadas a iguales profundidades (166,900 m y 115,182 m) y presentaron valores de propagación de ondas P y S por debajo de 2700 y 1100 m/s, y las muestras D1, D2, D3, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11 y D12 presentaron valores de propagación de ondas P y S por encima de 2700 y 1100 m/s (Tabla 10).

Tabla 10. Valores promedio de velocidad de onda P y S medidos con la sonda de registro.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Velocidad de onda P (m/s)	Velocidad de onda S (m/s)
BH63	D1	149,302 - 168,380	2780	1226
BH63	D2	81,911 - 136,072	2802	1251
BH63	D3	44,498 - 81,911	2736	1190
BH64	D4	166,900 - 209,905	2578	1059
BH64	D5	166,900 - 209,905	2780	1226
BH64	D6	115,182 - 154,011	2527	1011
BH64	D7	81,148 - 109,182	3409	1736
BH64	D8	27,300 - 38,100	2816	1250
BH65	D9	176,54 - 182,48	3394	1760
BH65	D10	176,54 - 182,48	3394	1760
BH65	D11	143,03 - 173,477	4331	3625
BH65	D12	37,563 - 55,50	2739	1193

Fuente: Autores.

5.8 Estimación de la resistencia

Los valores para las muestras D13 y D18 (Tabla 11) presentan valores irregulares según la metodología propuesta por Freyburg [28] y McNally [29]; debido a que la correlación pertenece a periodos más antiguos que la Formación Cerrejón. Sin embargo, según Chang [30] 31 empirical equations are summarized that relate unconfined compressive strength and internal friction angle of sedimentary rocks (sandstone, shale, and limestone and dolomite, los valores son cercanos a los calculados para la zona de estudio, ubicándolos dentro del rango de aplicabilidad para las rocas en estudio.

Tabla 11. Correlaciones empíricas para la compresión uniaxial (UCS) en areniscas.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Freyburg -1972	McNally -1987	Chang ét al -2006	Chang ét al (2006)
BH63	D13	149,302 - 168,380	58,73	14,73	7,74	3,88
BH65	D18	143,030 - 173,477	120,09	56,81	23,24	3,89

Fuente: Autores.

Según [31], el término lutita representa toda clase de rocas sedimentarias de grano fino que contienen una cantidad sustancial de minerales arcillosos que carece de una estructura sedimentaria bien conocida.

La tabla 12, evidencia que la última correlación de [32] various sources of the P-wave velocity such as sonic wireline, sonic measurement while drilling (MWD) presenta mejores resultados comparados con los obtenidos de los registros geofísicos (Tabla 12). Donde, al realizar la comparación (entre la tabla xx y la 12) la muestra DP5 tiene la mayor diferencia en puntos de 22,03 y 11,59 para cada correlación respectivamente.

Tabla 12. Correlaciones empíricas para la compresión uniaxial (UCS) en lutitas.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Lal (1999)	Horsrud (2001)
BH63	D14	44,498 - 81,911	25,46	11,62
BH64	D15	166,900 - 209,905	27,49	14,52
BH64	D16	115,182 - 154,011	25,86	12,15
BH64	D17	81,148 - 109,182	30,99	20,55

Fuente: Autores.

5.9 Estimación de dureza a partir de la resistencia a compresión simple y su efecto en las voladuras

En función de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), las rocas según [1], [28] se clasifican entre blandas y muy blandas (Tabla 13). Las muestras D13 y D18 (areniscas) y D14 y D17 (lodolitas) presentan valores muy altos de resistencia que las ubican dentro del rango de dureza como rocas blandas. Las muestras D15 y D16 (lodolitas) se clasifican como rocas muy blandas debido al alto contenido de arcilla, indicando variaciones de resistencia en función de la distribución del tamaño de los granos (Tabla 13).

Tabla 13. Dureza de las rocas en función de la UCS.

Código de pozo	Muestra	Profundidad (m)	Resistencia UCS (MPa)	ISRM (1981)
BH63	D13	149,302 - 168,380	8,74	Blanda
BH63	D14	44,498 - 81,911	6,09	Blanda
BH64	D15	166,900 - 209,905	4,81	Muy blanda
BH64	D16	115,182 - 154,011	4,77	Muy blanda
BH64	D17	81,148 - 109,182	8,96	Blanda
BH65	D18	143,030 - 173,477	10,61	Blanda

Fuente: Autores.

El éxito de la voladura radica principalmente en la selección del mejor explosivo y más adecuado, indicando que la litología del área de estudio precisa del uso de explosivos de baja densidad, potencia y velocidad de detonación [33]. Basado en Hagan [7] y a nivel general como lo indica la tabla 14, se establece la excavación en función de la dureza y velocidad sísmica de las rocas. Considerando las muestras en estudio, se deduce que cuanto más blanda es la roca como lo son D15 y D16, menor es la velocidad de propagación de ondas, la dureza y por tanto precisan voladuras ligeras, mientras que muestras menos blandas como D13, D14, D17 y D18 tienen valores más altos de velocidades y dureza que requieren voladuras ligeras a importantes, de altos consumos específicos (Tabla 14).

Tabla 14. Características de la excavación en función de la dureza y velocidad sísmica.

Velocidad sísmica (m/s)	Características de las rocas
< 1500	Rocas excavables con mototrailas excavadoras o tractores. No precisan voladuras.
1500 - 2000	Ripado fácil. Excavación de estratos sin volar, algo difícil para excavadoras o tractores con ripper.
2000 - 2500	Ripado algo costoso. Voladuras ligeras (Grandes esquemas, grandes longitudes de recatado, bajos consumos específicos).
2500 - 3000	Se precisan voladuras ligeras. Pre-voladuras.
> 4500	Se precisan voladuras importantes (Esquemas de perforación cerrados, pequeñas longitudes de recatado, altos consumos específicos)

*Adaptado de [8].

6. CONCLUSIONES

Con base a los resultados se concluye que, para la determinación de características físicas y mecánicas, se considera apropiado definir el tipo de roca, ensayándose grupos de muestras en condiciones óptimas con los cuales observar una tendencia, representatividad y anisotropía.

Los paquetes litológicos de la formación se clasificaron como areniscas de grano fino-medio a lodosas con intercalaciones plana paralelas a onduladas (D1, D7, D9 y D11) y lodolitas de grano fino a arenosas con alta cantidad de materia carbonosa (D2, D3, D4, D5, D6, D8 y D10), presentando densidades promedio de 2,40 g/cm³; con resultados mayores al 10% en porosidad total y gran cantidad de espacios abiertos. Mecánicamente, tienen valores de resistencia bajos al someterse a esfuerzos de compresión uniaxial, reflejados en una relación inversamente proporcional entre el comportamiento de las rocas y la distribución del tamaño de los granos, donde a mayor contenido de arcilla se ve una reducción en la propagación de las ondas a través de la roca y la rigidez o dureza de esta.

Asimismo, un mayor valor de módulo de Young representa una oposición de la roca a ser fracturada. Por tanto, las rocas correspondientes a lodolitas se clasifican como muy blandas (D15 y D16) precisando voladuras ligeras, mientras que areniscas a lodolitas arenosas (D13, D14, D17 y D18) menos blandas, requerirán voladuras ligeras a importantes, de altos consumos específicos; de modo que los gases del explosivo encontrarán menor resistencia para comprimir y dilatar la roca.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] L. González de Vallejo, Ingeniería geológica. Madrid (España), 2002. [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro_2.pdf
- [2] N. Caparrini-Marín, “Interpretación y correlación de registros geofísicos en sondeos de captación de aguas subterráneas para la caracterización hidrogeológica y la gestión de la explotación,” Universidad Politécnica de Madrid, 2006.

- [3] P. Ruiz-Cubillo, “Importancia del mapeo geológico para el estudio de la red vial nacional,” Boletín Técnico, vol. 4, no. 48, pp. 1–5, 2013.
- [4] C. Buitrago-Torres, “Caracterización de formación mediante relación Vp/Vs obtenidas con procesamiento de onda P y PS,” Universidad Nacional de Colombia, 2016. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59524>
- [5] ASTM C97/C97M-18, “Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone.” Accessed: Jan. 23, 2023. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0097_c0097m-18.html
- [6] N. A. D3148-02, “Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression.” Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d3148-02.html>
- [7] T. N. Hagan, “Some recommended features of future drilling equipment-a blasting engineer’s view,” Inst. Min. Metall. Trans., vol. 92, 1983.
- [8] J. Sanz-Contreras and J. Santamaría-Arias, Manual para el control y diseño de voladuras en obras y carreteras. 1993.
- [9] J. Rodríguez, “Propiedades físicas: densidad y porosidad.” Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/237009661_PROPIEDADES_FISICAS_DENSIDAD_Y_POROSIDAD
- [10] M. Serrano-Guzmán and D. Pérez-Ruiz, “Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto,” Concreto y Cem. Investig. y Desarro., vol. 2, no. 1, pp. 17–30, 2010, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112010000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [11] G. Davis, S. Reynolds, and C. Kluth, Structural Geology of Rocks and Regions. 1996.
- [12] D. Oyler, C. Mark, and G. Molinda, “In situ estimation of roof rock strength using sonic logging,” Int. J. Coal Geol., vol. 4, no. 84, pp. 484–490, 1997, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.07.002>.
- [13] ASTM D4543-19, “Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances.” Accessed: Jan. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d4543-19.html>
- [14] ASTM D3148-02, “Método de prueba estándar para módulos elásticos de muestras intactas de núcleos de roca en compresión uniaxial (retirado en 2005).” Accessed: Jan. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d3148-02.html>
- [15] P. Cortés-Moreno, E. Rojas-Martínez, F. Lascarro-Navarro, J. Ospino-Fragozo, and D. Manco-Jaraba, “Determinación del límite estratigráfico entre las Formaciones Cerrejón y Tabaco en la Pared Alta del tajo Annex de la mina Cerrejón, Colombia,” Inge Cuc, vol. 16, no. 2, pp. 1–10, 2020, doi: [10.17981/10.17981/ingecuc.16.2.2020.1](https://doi.org/10.17981/10.17981/ingecuc.16.2.2020.1).
- [16] C. Montes, G. Bayona, C. Jaramillo, C. Ojeda, M. Molina, and F. Herrera, “Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar- Rancheria valley : Rigid-beam pivot model,” in 6th International Symposium on Andean Geodynamics, 2005, pp. 520–523. [Online]. Available: http://www.researchgate.net/profile/Fabiany_Herrera/publication/32967501_Uplift_to_the_sierra_Nevada_de_Santa_Marta_and_subsi-dence_in_the_Cesar-Rancheria_valley__rigid-beam_pivot_model/links/542e8aba0cf27e39fa96254d.pdf
- [17] A. Arias and C. Morales, Mapa geológico generalizado del departamento del Cesar - Memoria explicati-

- va. Bogotá D.C., Colombia: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS) ;, 1999. Accessed: Sep. 21, 2020. [Online]. Available: <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=14212>
- [18] C. Jaramillo et al., “The Palynology of the Cerrejón Formation (Upper Paleocene) of Northern Colombia,” *Palynology*, vol. 31, pp. 153–189, Nov. 2007, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/40072706>
- [19] G. Bayona, C. Jaramillo, M. Rueda, A. Pardo, A. Christie, and G. Hernández, “Important paleotectonic and chronostratigraphic considerations of the late paleocene in the northernmost andes as constrained by paleocene rocks in the Cerrejón coal mine, Guajira, Colombia,” in *3ra Convención Técnica de la ACGGP*, Bogotá D.C., Colombia, 2004, pp. 1–14. Accessed: Nov. 01, 2020. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Important-Paleotectonic-and-Chronostratigraphic-of-Bayona-Jaramillo/a7afb0d165db083e-5218758142f8d9d3941c3beb>
- [20] Cerrejón and Ingetec, “Mapa geológico generalizado de la zona minera del cerrejón.” Accessed: Jun. 03, 2021. [Online]. Available: <http://extractivismoencolombia.org/consideraciones-ambientales-del-proyecto-carbonifero-cerrejon-operado-las-empresas-bhp-billiton-angloamerican-xstrata-la-guajira/>
- [21] D. Manco-Jaraba, E. Rojas-Martinez, and B. Gomez, “Petrographic study of the limestone deposit in the municipality of la Paz, department of Cesar,” *Prospectiva*, vol. 12, no. 2, pp. 82–89, 2014, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a09.pdf>
- [22] G. Rodríguez and A. C. Londoño, “Geología del departamento de la Guajira,” 2002. doi: 10.13140/RG.2.1.4146.2640.
- [23] J. N. Kellogg and W. E. Bonini, “Subduction of the Caribbean Plate and basement uplifts in the overriding South American Plate,” *Tectonics*, vol. 1, no. 3, pp. 251–276, Jun. 1982, doi: <https://doi.org/10.1029/TC001i003p00251>.
- [24] G. Ujueta and R. Llinás, “Reconocimiento Geológico de la parte más septentrional de la sierra de Perijá,” *Geol. Colomb.*, vol. 17, pp. 197–209, 1990.
- [25] R. L. Folk, *Petrologie of sedimentary rocks*. 1974.
- [26] Munsell, “Munsell soil color charts. Grand Rapids: Munsell Color .,” 2009.
- [27] C. J. Campbell, “The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting: Transactions of the Caribbean Geology Conference 4,” 1965, pp. 247–261.
- [28] E. Freyburg, “Der Untere und mittlere Buntsandstein SW-Thuringen in seinen gesteintechnischen Eigenschaften,” *Ber Dte Ges Geol Wiss A*, vol. 176, no. 6, pp. 911–919, 1972, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33645958984&partnerID=40&md5=8b54384f0aa6eda77775f085cff10426>
- [29] G. H. McNally, “Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs,” *Geoexploration*, vol. 24, no. 4, pp. 381–395, 1987, doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(87\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0016-7142(87)90008-1).
- [30] C. Chang, M. D. Zoback, and A. Khaksar, “Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 51, no. 3, pp. 223–237, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.01.003>.
- [31] M. Lal, “Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength,” *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. p. SPE-54356-MS, Apr. 20, 1999. doi: 10.2118/54356-MS.

- [32] P. Horsrud, “Estimating Mechanical Properties of Shale From Empirical Correlations,” *SPE Drill. Complet.*, vol. 16, no. 02, pp. 68–73, Jun. 2001, doi: 10.2118/56017-PA.
- [33] J. Bernaola-Alonso, J. Castilla-Gómez, and J. Herrera-Herbert, “Perforación y voladura de rocas en minería,” Madrid (España), 2013.