



Influencia de la mineralización en propiedades mecánicas de las rocas de la mina Yaraguá en Buriticá – Antioquia, Colombia

Influence of mineralization on mechanical properties of the rocks of the Yaraguá mine in Buriticá – Antioquia, Colombia

Jheyson S. Acosta-Luna ^a, Ludger O. Suarez-Burgoa ^b, Álvaro J. Castro-Caicedo ^b & Jorge M. Molina-Escobar ^b

jhsacostalu@unal.edu.co, losuarezb@unal.edu.co, ajcastro@unal.edu.co, ajcastro@unal.edu.co

^a Zijin Continental Gold, Medellín, Colombia

^b Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, Colombia

Manuscrito recibido: noviembre 3, 2021.

Recibido en formato revisado: enero 19, 2022.

Aceptado: abril 20, 2022.

Disponible en línea: mayo 4, 2022.

Resumen

Se realizó una caracterización geomecánica de un túnel guía para la explotación de oro en la mina Yaraguá (Continental Gold Limited) en el Municipio de Buriticá (Antioquia). El proceso de caracterización comprendió la clasificación del macizo rocoso mediante los sistemas de clasificación RMR y Q, análisis de secciones delgadas, ensayos de velocidad de ondas P, carga puntual simple y resistencia a compresión uniaxial y triaxial. Las rocas analizadas se clasificaron como basaltos, andesitas, dioritas y brechas, todas con minerales como magnetita, carbonatos y de pirita. En los ensayos de velocidad de ondas, las rocas alcanzaron un 70% de la velocidad teórica, mostrando índices de continuidad que están en el intervalo de fuerte a intermedia. La resistencia a compresión uniaxial en el intervalo de 42 MPa y 134 MPa. El comportamiento de las rocas bajo las cargas en el ensayo de compresión triaxial muestra una tendencia frágil a frágil-dúctil y con una resistencia máxima en el intervalo de 130 MPa a 150 MPa. A partir de todos estos ensayos se determinó que hay dos tipos de fallamiento asociado a la mineralización: ya sea a través de venillas o por zonas de acumulación de sulfuros.

Palabras clave: geomecánica; mineralización; ensayos de laboratorio.

Abstract

It was performed a geomechanically characterization of a guiding tunnel for the exploitation of gold in the Yaraguá mine (Continental Gold Limited) in the Municipality of Buriticá (Antioquia). The characterization process included the classification of the rock mass by the RMR and the Q systems, analysis of thin sections, tests such as the P-wave velocity, the point load test and the uniaxial and triaxial compression tests. The analyzed rocks classify as basalts, andesite, diorite and breccia, all with compound-minerals such as magnetite, carbonates and pyrite. In the wave velocity tests, the rocks have reached 70% of theoretical speed, giving *continuity indices* in the interval of strong to medium. The uniaxial compressive strength is between 42 MPa and 134 MPa. The behavior of the rocks under the loads in the triaxial compression test shows a fragile to fragile-ductile tendency and its peak resistance are in the interval from 130 MPa to 150 MPa. Finally, upon all these tests, one concludes that there are two types of failure associated with mineralization: either through veins or by sulphide accumulation zones.

Keywords: geomechanics; mineralization; laboratory tests.

Cómo citar este artículo:

Acosta-Luna, J.S., Suarez-Burgoa, L.O., Castro-Caicedo, A.J. y Molina-Escobar, J.M., (2022). Influencia de la mineralización en propiedades mecánicas de las rocas de la mina Yaraguá en Buriticá – Antioquia, Colombia.. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 51, pp. 23 - 37. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n51.99326>



1. Introducción

Se define como *macizo rocoso* a la unidad donde se presentan las rocas en el medio natural, compuesto por la roca intacta y sus discontinuidades de origen geológico; discontinuidades como planos de foliación, planos de estratificación, bandeamientos, fallas, pliegues o diaclasas. Estas discontinuidades le otorgan al macizo, en algunos casos, un grado de heterogeneidad en sus propiedades (Ramírez y Alejano, 2004). Las clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso son una herramienta clave en el diseño de obras de ingeniería: en ingeniería civil y minera especialmente. No obstante, la caracterización y clasificación de un macizo solo es un medio para comunicar adecuadamente sus propiedades y no debe tomarse como una alternativa a los procedimientos detallados de diseño de ingeniería sobre todo en excavaciones subterráneas complejas (Bieniaswski, 1989). Al hablar de una roca intacta, hay que tener en cuenta que sus propiedades mecánicas dependen principalmente de sus características petrográficas, como composición mineralógica y sus parámetros texturales. También a nivel de macizo rocoso, las discontinuidades juegan un papel fundamental en la forma como el macizo rocoso puede fallar, para un determinado régimen de esfuerzos determinado (Rigopoulos et al., 2011). El presente trabajo busca plantear una primera aproximación en la relación entre las características mecánicas de las rocas correspondientes a una explotación de oro en una mina en el municipio de Buriticá (departamento de Antioquia) en Colombia y su la mineralogía asociada a eventos mineralizantes.

Para esto se realizó una revisión de antecedentes, mapeo geomecánico de una sección de un túnel guía de la mina, por medio de líneas de detalle y celdas, caracterización del macizo rocoso con el sistema RMR (RMR de las siglas en Inglés de *Rock Mass Rating*) y en el sistema Q [2,4] durante dos visitas de campo a la mina.

Para el análisis de las propiedades mecánicas se hicieron ensayos de laboratorio, tales como caracterización petrográfica de las rocas mediante secciones delgadas, ensayos de velocidad de ondas p, ensayos de carga puntual simple, ensayos de resistencia a compresión uniaxial y compresión triaxial de cuerpos de prueba.

Esta investigación se realizó en el Proyecto Buriticá de *Continental Gold Limited*, en la mina subterránea correspondiente al sistema mineralizado Yaraguá ubicada en jurisdicción del Municipio de Buriticá; ubicada a 92 km en dirección noroeste de la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia en Colombia (Fig. 1).

2. Marco geológico

2.1 Geología regional

La zona de estudio se encuentra enmarcada en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental de los Andes en Colombia, al oeste del río Cauca y abarca las siguientes unidades litoestratigráficas: Diabasas de San José de Urama



Figura 1a Localización regional del área de trabajo
Fuente: Imagen base descargada de Google Earth

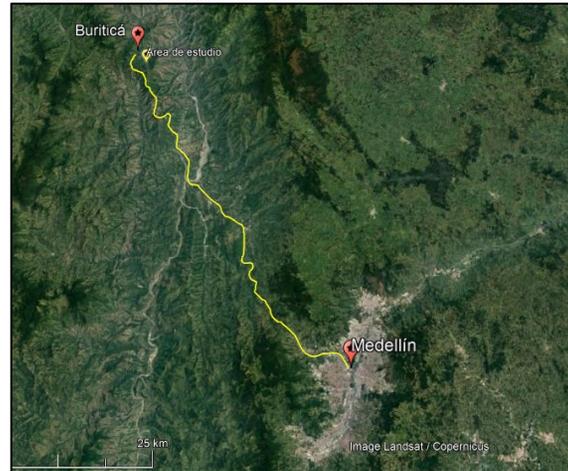


Figura 1b. Localización del Proyecto al NW de Medellín, Colombia.
Fuente: Imagen base descargada de Google Earth.

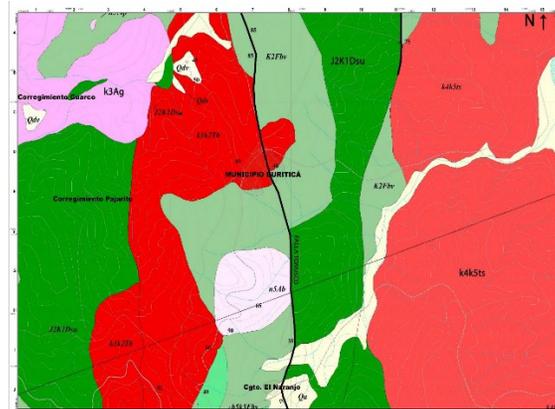


Figura 2. Geología regional de la zona de estudio.

Leyenda: Qa: Depósitos aluviales; Qdv: Depósitos de vertiente; n5Ab: Andesita de Buriticá; k4k5Ts: Tonalita de Santa Fe de Antioquia; K2Fbv: Formación Barroso (rocas Volcánicas); k3Ag: Andesita de Guarco; k1k2Tb: Tonalita de Buriticá; J2K1Dsu: Diabasas de San José de Urama.
Fuente: [Correa et al. \(2018\)](#)

(J2K1Dsu), Tonalita de Buriticá (K1K2tb), Andesita del Guarco (K3Ag), Formación Barroso (K2Fbv), Tonalita de Santa Fe de Antioquia (k4k5Ts), Andesita de Buriticá (n5Ab) y Depósitos de vertiente (Qdv) y Depósitos aluviales (Qa) ([Correa et al., 2018a](#)) (Fig. 2).

El área del Proyecto Buriticá se encuentra afectada por un conjunto de fallas regionales de tendencia norte-sur asociadas al sistema de fallas Cauca y Romeral. La estructura regional más importante en la zona es la Falla Tonusco, la cual corresponde a una falla con una longitud aproximada de 68 km que controla parte del curso del río Tonusco, así como una serie de estructuras con tendencia Este – Oeste que cortan los sistemas mineralizados Yaraguá y Veta Sur (Jones, 2019) (Fig. 2).

2.2 Geología local

El sistema mineralizado de la mina Yaraguá presenta una geología definida por el Complejo Intrusivo de Buriticá (BIC, de las siglas en Inglés de *Buriticá Intrusive Complex*), que abarca al conjunto de rocas de texturas porfídicas del Mioceno con una composición intermedia conformada por dioritas, andesitas, dacitas, monzodioritas y brechas intrusivas/hidrotermales que se han emplazado en las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Barroso y las rocas ígneas plutónicas de la Tonalita de Buriticá (Jones, 2019). En la Fig. 3 se observa un corte vertical donde se aprecia las rocas descritas de la geología regional del sitio. Se presume que estas rocas, de acuerdo con sus características, pueden estar asociadas al cuerpo intrusivo conocido como Andesita de Buriticá datada en 7,44 +/- 0,075 Ma U/Pb en zircón (Correa et al., 2018b)

Las estructuras dominantes en el sitio son la falla Tonusco (de carácter sinextral), la falla Oeste y la zona de diatremas (conjunto de brechas mineralizadas).

2.3 Clasificación geomecánica del proyecto

El proyecto minero, de acuerdo con un modelo geológico-estructural y la caracterización geomecánica, se ha dividido en

cinco dominios con similitud en calidad del macizo rocoso y propiedades mecánicas de la roca.

Hay tres dominios asociados a la zona de diatrema: el primero se conoce como zona de falla, cuyas rocas son de baja calidad geomecánica y una resistencia a compresión uniaxial (UCS) de 50 MPa; el segundo dominio es el bloque techo de diatrema, sus rocas de buena calidad con una resistencia a compresión uniaxial de 98 MPa; y el tercer dominio es el bloque piso, donde las rocas tienen buena calidad y una UCS de 90 MPa.

Los dominios restantes se asocian a la influencia de las fallas Tonusco y Oeste. Se prevé que la calidad de los macizos rocosos es baja y su resistencia similar a las encontradas para la zona de falla de diatremas. La Fig. 4 ilustra un esquema de la clasificación geomecánica realizada en el proyecto.

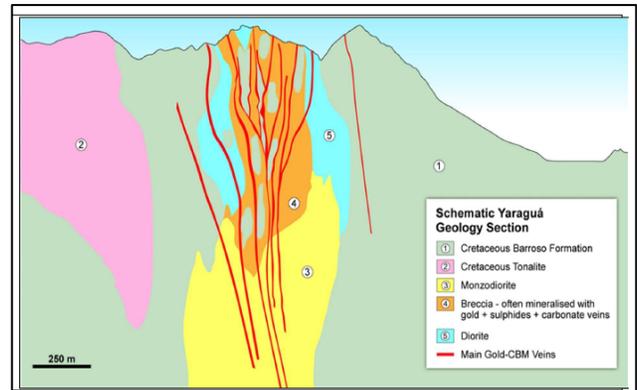


Figura 3. Corte geológico esquemático local del sistema Mineralizado en la mina Yaraguá.

Fuente: (Jones, 2019)

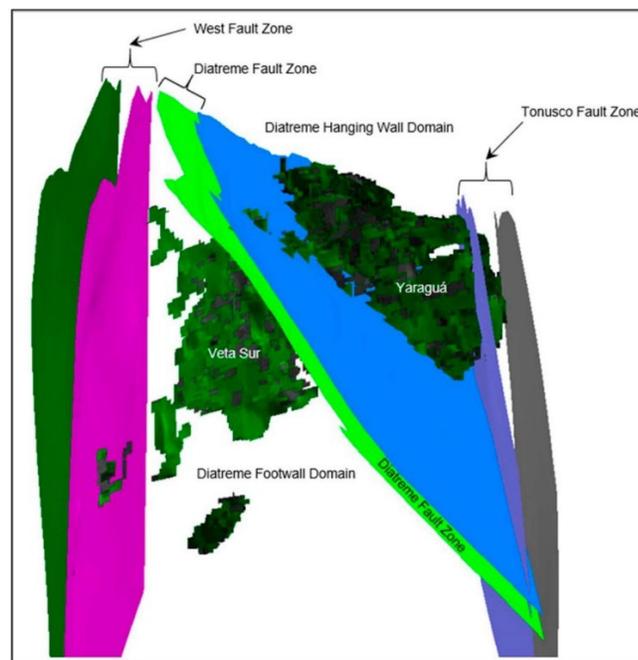


Figura 4. Clasificación geomecánica del yacimiento.

Fuente: (Jones, 2019)



Figura 5. Fotografías túnel guía, área de estudio.
Fuente: Los Autores.

3. Área de estudio

El mapeo geomecánico se realizó en un túnel guía correspondiente al sistema mineralizado Yaraguá; cuya sección es de tipo herradura de 2,5 m x 2,5 m (ancho x alto) de forma recta en los hastiales y semicircular en el techo (Fig. 5).

4. Resultados

4.1 Mapeo Geomecánico

Siguiendo los lineamientos propuestos en la Guía de Criterios Geomecánicos (Osinegmin, 2017) para el mapeo en el túnel

guía de la mina Yaraguá y para la clasificación del macizo rocoso, se hizo uso del mapeo de detalle por celdas (*scancell*) y mapeo por línea (*scanline*).

El primer mapeo se hizo por celdas cuadradas de un metro de lado para poder calcular directamente el índice volumétrico de diaclasas y estimar el Índice de calidad de la Rocas – RQD – (de la sigla en inglés *Rock Quality Designation*). En las secciones del túnel, la roca tiene alto grado de fracturamiento con varias familias de diaclasas que forman bloques casi cúbicos de entre 50 cm a 60 cm de lado. También se observó la influencia de zonas de cizalla en el macizo rocoso con brecha de falla o vetas alteradas mineralizadas (Fig. 6).



a) Fracturamiento.

Figura 6. Fotografías de ciertas facciones estructurales del macizo rocoso.
Fuente: Los Autores.



b) Zona de cizalla mineralizada.



Figura 7. Fotografía de la zona de cizalla.
Fuente: Los Autores.

El mapeo por línea de detalle consiste en registrar las discontinuidades expuestas en la roca a lo largo de una longitud determinada. Para este estudio se hicieron líneas de 7 m a 8 m de longitud. Se registraron algunas familias de

diaclasas y fallas locales con brecha de falla (Fig. 7). Se observó que varios sitios mapeados ya presentaban sostenimiento con pernos tipo *split set* y malla electrosoldada en las paredes y en el techo de la excavación.

4.2 Resultados clasificación

Durante el mapeo se realizó la medición de varias estructuras principales escogidas de forma aleatoria en las paredes del túnel. Sin embargo, la clasificación del macizo rocoso se hizo respecto a las estructuras más críticas observadas.

Se utilizó el martillo de rebote Schmidt tipo L para obtener, mediante relaciones empíricas, el valor de la resistencia a la compresión uniaxial; dando valores (R) entre 35 a 40 rebotes. Además, conociendo que la densidad de la roca está entre 2,7 y 2,8 g/cm³ (andesita - basalto), se obtuvo un de la UCS esencialmente concentrado en el intervalo de 90 MPa a 100 MPa.

La Tabla 1 ilustra los valores obtenidos con base en la evaluación de los parámetros de las diaclasas y de la roca según Bieniaswski.

Tabla 1.
Índice RMR para discontinuidades

Discontinuidad	Dip Dir:	Dip:	Puntos	Clase	Calidad Macizo
Discontinuidad 1	150	75	53	III	Media
Discontinuidad 2	200	80	49	III	Media
Discontinuidad 3	130	50	61	II	Buena
Discontinuidad 4	115	70	47	III	Media

Fuente: Los autores a partir de Bieniaswski (1989).

Los resultados en la clasificación por el sistema Q se presentan en la Tabla 2. Para el valor de la variable ESR (que usa el sistema Q) se seleccionó un valor de 2, dado para labores temporales. El parámetro de la altura de la galería (*i.e. span*), utilizado para el cálculo fue 2,5 m.

Así, el macizo rocoso evaluado tiene una calidad entre media a muy buena, cuyo sostenimiento sugerido es de pernado localizado o sin sostenimiento.

Con la valoración del macizo rocoso según el Índice Geológico de Resistencia (GSI) se inclina a valores entre 45 % y 55 %, según la valoración de las condiciones de las diaclasas.

Tabla 2.
Índice Q para discontinuidades

Discontinuidad	Clasificación sistema Q, discontinuidades principales							
	RQD (%)	Jn	Ja	Jr	Jw	SRF	ESR	Q
1	89	6	2	1,5	1	1	2	11,1
2	49	9	2	2	1	1	2	5,4
3	82	3	2	3	1	1	2	41,0
4	49	12	2	2	1	1	2	4,1

Fuente: Los autores a partir de Barton et al. (1974).

4.2.1 Preparación muestras

Se recolectaron nueve muestras correspondientes a rocas ígneas caracterizadas en campo como basaltos de color verde, de grano fino con presencia de mineralización de sulfuros (*e.g.* piritita) en forma de venillas y también diseminados. Los bloques presentan tamaños de hasta 50 cm de lado.

Para realizar los ensayos de compresión triaxial, carga puntual y velocidad de ondas se procedió a obtuvieron siete núcleos con diámetro de 54 mm y una longitud de 130 mm utilizando una broca de perforación tipo NX (Fig. 8a). Durante la obtención de los núcleos no se tuvo en cuenta ninguna dirección preferencial asociada a venas, fracturas o alguna discontinuidad presente. Algunos bloques de roca con fracturamiento interno no resistieron la rotación de la broca y se rompieron por sus planos de debilidad en unos casos, y se fragmentó el núcleo, en otros.

4.2.2 Caracterización material

Se identificaron tres tipos de rocas, así:

1. Roca de textura fanerítica equigranular, holocristalina,

moteada, compacta, compuesta por cristales con tamaño entre 1 mm a 5 mm de plagioclasa (45%), cuarzo (5%) y anfíboles tipo hornblenda (50%). Presenta una tonalidad gris verdosa asociada posiblemente a alteración de tipo hidrotermal. También, posee algunas venas de carbonatos y cristales de pirita diseminada. Esta roca se clasificó como diorita.

Asociada a la diorita existe otra roca con textura fragmental, compacta, con venillas de magnetita, pirita y algo de carbonatos. Se clasificó como una brecha a partir de diorita ya que los fragmentos que posee son ígneos de grano fino, compuestos por anfíboles y plagioclasa. Además, parece estar silicificada (Fig. 9).

2. Rocas con textura porfídica, holocristalina, compacta, compuesta por fenocristales subhedrales de plagioclasa y anfíbol (tamaños entre 1 mm y 3 mm) y una matriz de color grisáceo con carbonatos. Presenta mineralización en forma de venillas desordenadas de pirita y algunos óxidos como magnetita. Se clasificó como una fenoandesita, vea la Fig. 10.
3. Roca de textura afanítica, holocristalina, compacta, masiva, de coloración gris – verdosa, con una leve



Figura 9. Fotografías núcleos de roca 1. Diorita y brecha a partir de diorita. Fuente: Los Autores

variación textural representada por fenocristales subhedrales de plagioclasa y anfíbol de color verde con tamaños mayores a 1 mm (localmente decusados). En su estructura se determinó la presencia de carbonatos diseminados y en forma de venillas de grano muy fino. Se observa, además, que los ejemplares se encuentran mineralizados con sulfuros como pirita y óxidos como magnetita. La pirita es el sulfuro más abundante en la roca y se encuentra en forma diseminada, en cúmulos y en algunas venillas de espesor entre 0,5 mm y 1 mm. Se clasificó como basalto espilitizado (Fig. 11).

4.2.3 Caracterización microscópica

La roca caracterizada con secciones delgadas y petrografía microscópica corresponde a un basalto espilitizado (tipo 3). Sus núcleos se representan con la letra J y el número 9 en la presente nomenclatura. Este material corresponde a la roca de caja, es la litología más representativa y tiene el mayor grado de mineralización. El análisis petrográfico indica matriz microcristalina (55%) compuesta por cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita, anfíbol y calcita, con tamaños menores a las 100 micras (Fig. 12). Los fenocristales (45%), generalmente, se encuentran alterados, reemplazados y fracturados. Sus características se presentan en la Tabla 3.



a) De un bloque de roca y broca de perforación tipo NX.



b) De un bloque de roca y broca de perforación tipo NX.

Figura 8. Registro del proceso de preparación de las muestras. Fuente: Los Autores



Figura 10. Fotografías núcleos de roca tipo feno-andesita. Fuente: Los Autores

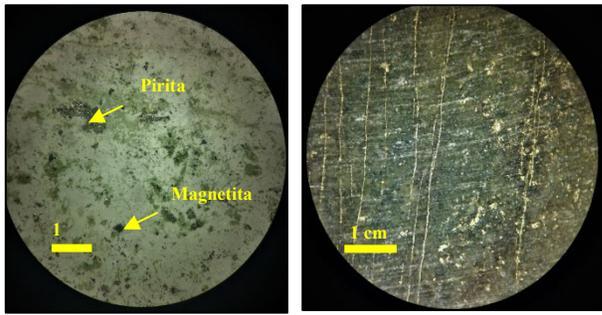


Figura 11. Fotomicrografías de basalto espilitizado con mineralización diseminada y en venillas paralelas. Lupa estereoscópica. Fuente: Los Autores

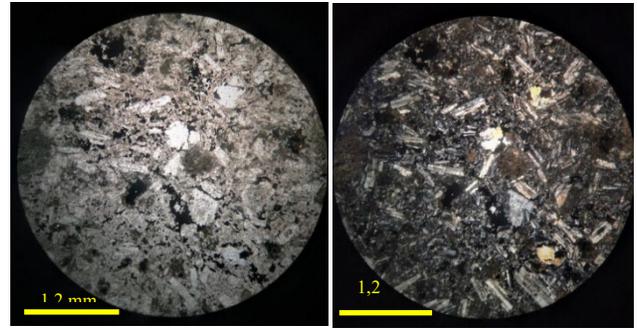


Figura 12. Fotomicrografías de basalto espilitizado con textura porfídica. Nícoles 4x. Izquierda: Nícoles paralelos. Derecha: Nícoles cruzados. Fuente: Los Autores

Tabla 3. Mineralogía de la muestra J9

Mineral	%	Descripción
Plagioclasa Pl	55	Sus cristales se presentan en forma alargada, con desarrollo euhedral a subhedral, de tamaños hasta 0,8 mm, y con una coloración blanco-amarillenta. En nicoles cruzados se observa que un 10 % de los cristales están fracturados, presentan saussuritización/sericitización, maclado polisintético, con núcleos zonados y algunos bordes irregulares, Fig. 13. Se estima que su composición está entre andesina y oligoclasa.
Anfíboles Anf	25	Representados por la hornblenda, presenta alto grado de alteración y reemplazamiento por minerales como biotita, prehnita, epidota y algunos carbonatos. En nicoles paralelos se observan cortes longitudinales y basales de coloración gris – verdosa a café (Fig.13). El tamaño de los cristales está entre 0,7 a 1 mm.
Epidota Ep	3	Mineral de alto relieve, caracterizado por su coloración verde-amarillento en luz paralela y distribuido a lo largo de toda la roca de forma granular con cristales subhedrales de 100 µm de tamaño (Figs. 14 a 16). Se presenta, también, en medio de algunas fracturas asociadas al posible al efecto de fluidos hidrotermales, ya que se encuentran acompañados de varios minerales opacos y carbonatos.
Cuarzo Qz	7	Su característica principal se concentra en fenocristales poligonales con diámetro de 350 µm, conformados por varias agrupaciones de cristales anhedral con colores de interferencia de primer orden (gris – amarillo), Fig. 17. También se presentan distribuidos en forma de granos anhedral en la matriz (Fig. 12).
Carbonatos – Calcita. Cal	2	Sus cristales, en su mayoría anhedral, se presentan tanto en las venillas con epidota y opacos como en los bordes alterados de las plagioclasas y de los anfíboles (Fig. 15). Algunos de los granos miden entre 100 µm y 200 µm.
Biotita Bt	1	Se presenta como reemplazamiento de algunos anfíboles, tiene una coloración café y cristales subhedrales de geometría alargada (tamaño ≈ 100 µm).
Opacos Op	5	Sus cristales se distribuyen por toda la muestra en forma de granos diseminados y en venillas junto con epidota, carbonatos, cuarzo. El tamaño es muy variable, encontrándose ejemplares dentro de plagioclasas de 50 µm y en las venillas de 500 µm.
Otros	1	En menor proporción se observaron minerales como esfena, óxidos de hierro y prehnita.

Fuente: Los autores

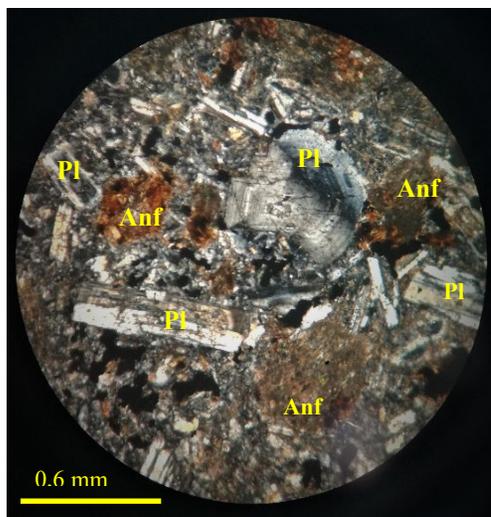


Figura 13. Fotomicrografía de cristales de plagioclasa (Pl) alterados y zonados, anfíboles (Anf) subhedrales y minerales opacos diseminados. Nícoles cruzados, 10x. Fuente: Los Autores

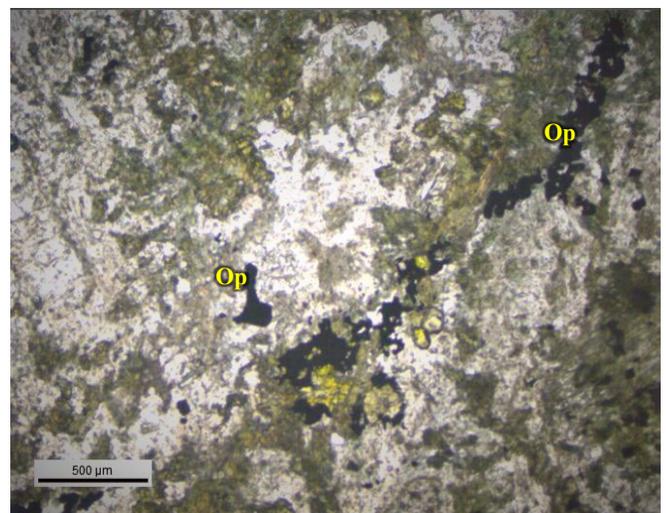


Figura 14. Fotomicrografía de cristales de epidota (verde) y minerales opacos (Op). Nícoles paralelos.10x Fuente: Los Autores

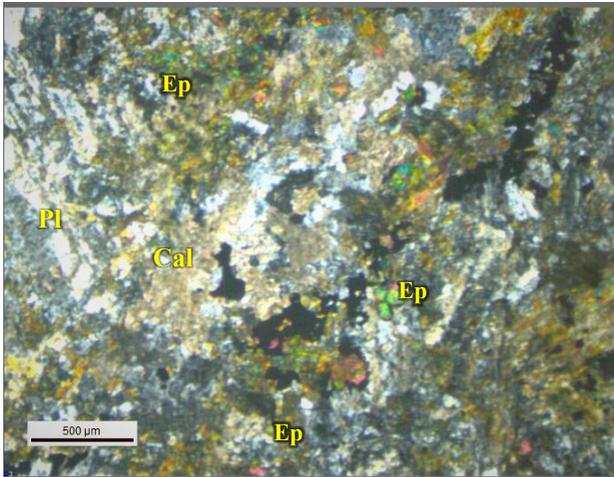


Figura 15. Fotomicrografía de cristales de epidota (Ep) y calcita (Cal) en fractura con opacos. Pl: plagioclasa. Nícoles cruzados. 10x
Fuente: Los Autores

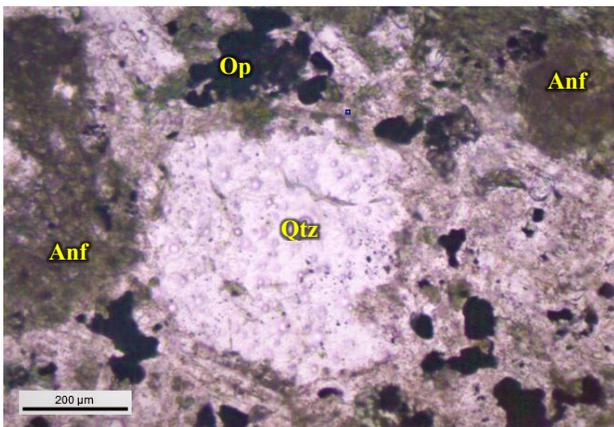


Figura 16. Fotomicrografía de cristales de cuarzo (Qtz), anfíbol (Anf) y opacos (Op). PPL. 10x
Fuente: Los Autores

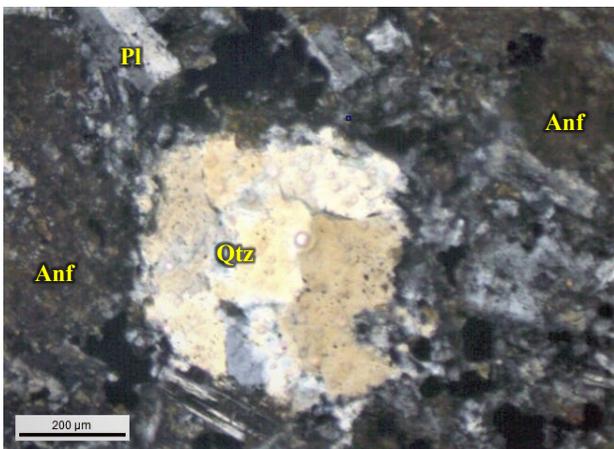


Figura 17. Fotomicrografía de cristales de cuarzo (Qtz), anfíbol (Anf) y opacos. Pl: plagioclasa. Al cruzar los nícoles se observa que el cristal de cuarzo está conformado a su vez por otros más pequeños en intercrecimiento, Nícoles cruzados. 10x.
Fuente: Los Autores.

4.2.4 Ensayo de velocidad de ondas

Se realizó el ensayo de velocidad de ondas P para determinar las propiedades de microfracturación, porosidad y grado de alteración de la matriz rocosa según (Ramírez y Alejano, 2004). Se utilizó el PUNDIT (de la sigla en Inglés de *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), el cual posee una potencia de 250 V y una precisión en la medición de los pulsos del ultrasonido de 0,1 μs (Fig. 18).

El cálculo de la velocidad de viaje de las ondas P de las muestras de roca se realiza automáticamente por el equipo. Aquí los pulsos eléctricos emitidos son convertidos en pulsos mecánicos por medio de un emisor, haciendo que viajen a través del cuerpo y posteriormente estos pulsos son recibidos por un receptor, para convertirse nuevamente en pulsos eléctricos. En esta operación es necesario insertar una frecuencia y la longitud promedio del núcleo.

Los resultados de la medición de los tiempos y velocidad de ondas P (para los seis cuerpos de prueba de roca, caracterizados y nombrados según su litología para este estudio) se presentan en la [Tabla 4](#).

En la [Fig. 19](#) se presenta el comparativo entre las velocidades de onda P obtenidas en el laboratorio versus los valores teóricos según ([Dobrin, 1960](#)).

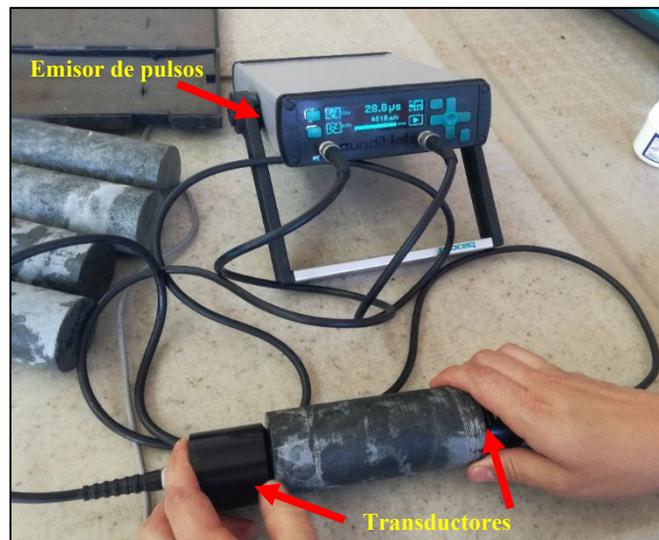


Figura 18. Equipo para la medición de los tiempos de viaje de las ondas P y su velocidad en los núcleos de roca – PUNDIT.
Fuente: Los Autores.

Tabla 4.
Velocidad de ondas P en las muestras de roca

Muestra	Roca	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Tiempo (μs)	Velocidad (m/s)
J6	Andesita	54,7	133,8	30,4	4375
J3N2	Brecha	54,7	133,5	31,3	4249
J3N1	Brecha	54,6	134,4	29,7	4478
J9N1	Basalto	54,5	133,4	28,8	4602
J9N2	Basalto	54,5	131,5	28,5	4596
J7	Diorita	54,7	132,2	29,6	4459

Fuente: Los Autores

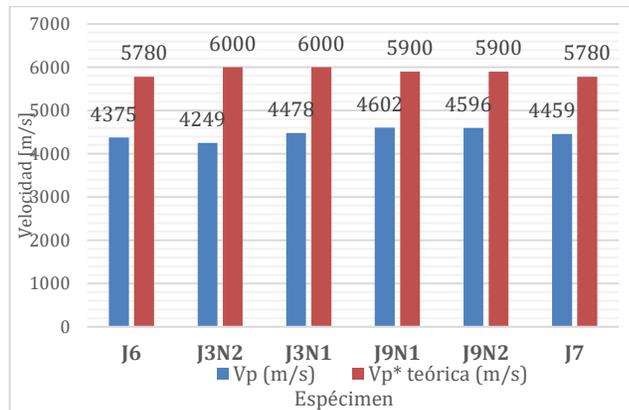


Figura 19. Gráfico comparativo entre las velocidades de onda P teóricas vs velocidades obtenidas en laboratorio.

Fuente: Los Autores.

4.2.5 Índices de continuidad

De acuerdo con [Sharma and Singh \(2008\)](#) algunos de los factores que influyen la velocidad de propagación de las ondas P son la litología, densidad, forma de los granos, porosidad, anisotropía, humedad presente en la roca, presión de confinamiento, temperatura, planos de debilidad y microfisuras.

Para esto, se han establecido unos índices de continuidad (IC) que comparan la velocidad de las ondas P (Vp) en una roca intacta versus cualquier espécimen a estudiar de características similares calculados mediante la ecuación 1 de [González de Vallejo et al. \(2002\)](#)

$$IC (\%) = \frac{V_p}{V_{p_teórica}} 100 \quad (1)$$

Los autores clasifican los índices para los números obtenidos en la relación de las velocidades de onda. Para valores mayores a 90 % se tiene continuidad muy alta en la matriz rocosa, mientras que para valores menores a 25 % se puede inferir que hay alto grado de alteración debido a la muy baja continuidad ([Tabla 5](#)).

Así, los valores de *índices de continuidad* para las muestras analizadas se presentan en la [Tabla 6](#).

Tabla 5. Valores de índices de continuidad

Índices	Valores de Índice de Continuidad ic	Continuidad
IC 1	IC > 90%	Continuidad muy fuerte
IC 2	75% < IC < 90%	Continuidad fuerte
IC 3	50% < IC < 75%	Continuidad media
IC 4	25% < IC < 50%	Continuidad débil
IC 5	IC < 25%	Continuidad muy débil

Fuente: [González de Vallejo et al. \(2002\)](#)

Tabla 6. Valores de índices de continuidad en los ensayos.

Muestra	Litología	VP [m/s]	VP Teórica [M/S]	IC (%)	Clasif.	Continuidad
J6	Andesita	4375	5780	76	IC 2	Fuerte
J3N2	Brecha	4249	6000	71	IC 3	Media
J3N1	Brecha	4478	6000	75	IC 3	Media
J9N1	Basalto	4602	5900	78	IC 2	Fuerte
J9N2	Basalto	4596	5900	78	IC 2	Fuerte
J7	Diorita	4459	5780	77	IC 2	Fuerte

Fuente: Los Autores

Tabla 7. Ecuaciones empíricas para calcular la resistencia a la compresión simple.

Muestra	Velocidad de Ondas P [Km/s]	Resistencia a la compresión simple [MPa] según los autores				
		Goktan, 1988	Tugrul & Zarif, 1999	Sharma & Singh 2008	Yagiz, 2011	Sarkar et al., 2012*
J6	4,375	126,3	100,49	112,13	49,13	116,25
J3N2	4,249	121,8	96,01	107,59	42,90	111,46
J3N1	4,478	130,0	104,15	115,84	54,21	120,16
J9N1	4,602	134,5	108,56	120,30	60,34	124,88
J9N2	4,596	134,3	108,34	120,09	60,04	124,65
J7	4,459	129,3	103,47	115,15	53,27	119,44

*Para la ecuación planteada por Sarkar et al. (2012) el valor de la velocidad de ondas debe incluirse en metros / segundo.

Fuente: Modificado de [Azimian et al. \(2014\)](#)

4.2.6 Relación entre velocidad de ondas P (km/s) y resistencia a la compresión simple uniaxial UCS (MPa)

La relación entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y la velocidad de las ondas P (Vp) ha sido estudiada por varios investigadores a lo largo del tiempo en diferentes tipos de rocas. Para esta investigación solo se citó algunas de las que abarcan rocas ígneas; estableciendo relaciones empíricas entre estos parámetros como se presenta en la [Tabla 7](#).

Los valores de resistencia para las rocas oscilan entre 42 MPa y 134 MPa, [Tabla 8](#) y [Fig. 20](#).

4.2.7 Ensayo de carga puntual simple

Bajo la Norma ASTM D5731-16 ([ASTM, 2016](#)) se realizaron los procedimientos para evaluar las propiedades mecánicas de las rocas en un ensayo diametral bajo el sistema de carga de la prensa Franklin ([Fig. 21](#)). Se usaron cuatro núcleos de 54 mm de diámetro para el ensayo.

Tabla 8. Ecuaciones empíricas para calcular la resistencia a la compresión simple.

Ecuación	Fuente
UCS = 36.0 Vp - 31.2	Goktan (1988)
UCS = 35.54 Vp - 55	Tugrul & Zarif (1999)
UCS = 36 Vp - 45.37	Sharma & Singh (2008)
UCS = 49.4 Vp - 167	Yagiz (2011)
UCS = 0.038 Vp - 50	Sarkar et al. (2012)

Fuente: Los Autores

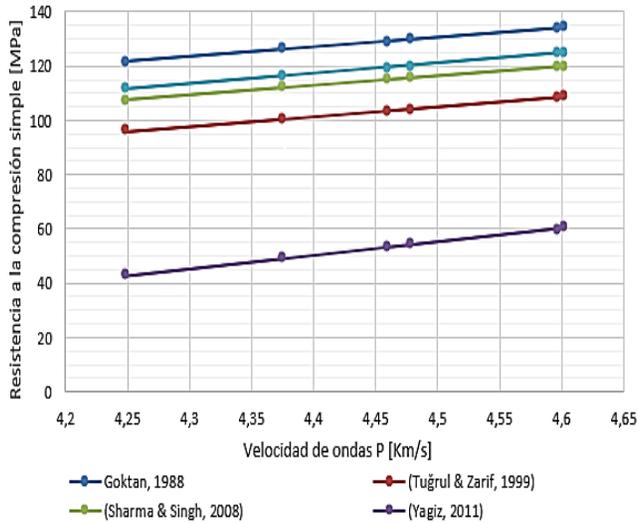


Figura 20. Valores de la resistencia a la compresión simple UCS [MPa] a partir de la velocidad de ondas P.
Fuente: Los Autores



Figura 21. Sistema de carga tipo prensa Franklin para ensayos de carga puntual.
Fuente: Los Autores.

Las ecuaciones usadas de acuerdo con la Norma son:

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (2)$$

$$I_{s50} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45} I_s \quad (3)$$

Is: Índice de carga puntual
P: Carga de rotura [N]
D: Diámetro núcleo [m]

La norma ASTM D5731 (ASTM, 2016) plantea además algunos modelos de falla para los ensayos de carga puntual diametrales desarrollados en el presente estudio (Fig. 22).

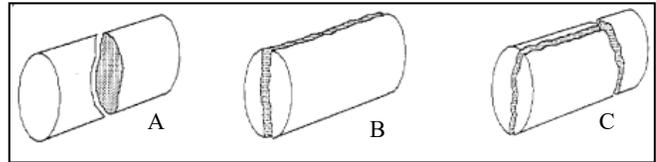


Figura 22. Modelos de falla ensayos diametrales.
Fuente: ASTM (2016)

Tabla 9. Resultados ensayo de carga puntual.

Muestra	Área Pistón [m ²]	Presión [MPa]	0,0014			Resistencia
			D [m]	Presión de rotura [MPa * m ²]	Is [MPa]	
J9N32	22,8	0,054	0,033	11,09	11,53	Muy alta resistencia
J3N31	2,5	0,054	0,004	1,21	1,26	Baja resistencia
J3N32	4,8	0,054	0,007	2,33	2,42	Mediana resistencia
J8	2,8	0,054	0,004	1,39	1,44	Baja resistencia

Fuente: Los Autores.

La clasificación de los núcleos de roca según el índice de carga puntual oscila entre muy alta resistencia y baja resistencia (Tabla 9), esto se asocia principalmente a la presencia de venillas, ya que el fallamiento se dio por planos de debilidad definidos por la mineralización.

Se obtuvo dos resultados particulares comparando las superficies de falla de algunos de los núcleos sometidos en la prensa. El primer resultado comprende fallamiento a través de planos de debilidad (Fig. 23) creados por la mineralización de sulfuros en forma de venillas paralelas visibles con espesor de hasta 1 mm tal y como se sugiere en la Fig. 22.B. El caso segundo de fallamiento comprende estructuras que no son visibles a simple vista en el núcleo, pero que su geometría está determinada por mineralización de pirita como se observa en la Fig. 24 y tiende a ser irregular como en la Fig. 22.



Figura 23. Modelos de falla ensayos diametrales.
Fuente: Los Autores



Figura 24. Modelos de falla ensayos diametrales.
Fuente: Los Autores

4.2.8 Ensayo de compresión triaxial

Se realizó el ensayo de compresión triaxial a cinco de los siete núcleos de roca obtenidos inicialmente (longitud de 130 mm y 54 mm de diámetro) con la Norma ASTM 2664-95 (ASTM, 1995). Se utilizó la cámara de compresión triaxial del Laboratorio de Mecánica de rocas de la Universidad Nacional de Colombia (Fig. 25).

Los parámetros utilizados en la prensa fueron: presión de confinamiento de 5 MPa y 8 MPa, velocidad de carga de 0,2 MPa y velocidad del ensayo de 0,5 MPa/s. Como resultado de los ensayos se obtuvieron curvas de esfuerzo-deformación comparadas en la Fig. 26.

Núcleo J9N2: La curva esfuerzo-deformación, arrojada al finalizar el ensayo, presenta un comportamiento dúctil (Fig. 26). La primera etapa entre 0 % y 0,38 % de deformación unitaria tiene un comportamiento lineal. Sin embargo, aquí se genera un quiebre que se asume como una primera falla de la roca. Posteriormente, la resistencia sigue aumentando hasta un pico de 130 MPa para luego decaer a una resistencia residual de 119 MPa (Fig. 27).



Figura 25. Cámara de compresión triaxial y celda Hoek.
Fuente: Los Autores

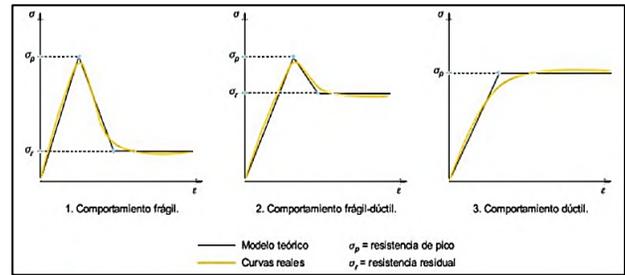


Figura 26. Modelos de comportamiento Esfuerzo – Deformación.
Fuente: Yagiz (2011)

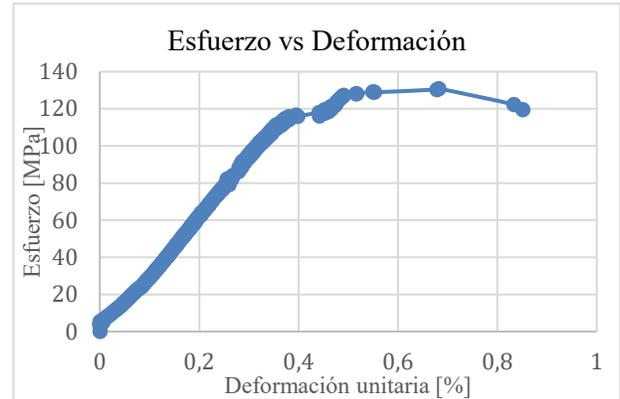


Figura 27. Curva esfuerzo deformación, confinamiento 5 MPa.
Fuente: Los Autores

Estas características en la falla, según González de Vallejo et al. (2002), se deben a que durante la carga, la roca se va deformando paulatinamente, generando varios planos de rotura. El módulo de Young obtenido es de 29 GPa.

Rotura. Se observó que la rotura en la roca ocurre formando dos planos. El plano principal se da en diagonal siguiendo patrón de mineralización, mientras que el segundo plano se



Figura 28. Núcleo de roca antes (intacto) y después del ensayo de compresión triaxial.
Fuente: Los Autores

da en forma semiparalela al eje del núcleo sin seguir ninguna estructura (Fig. 28). En su base, el fracturamiento se intensifica produciendo una especie de abombamiento con fracturas de, aproximadamente, cinco centímetros de largo. En medio de las fracturas generadas hay presencia de carbonatos diseminados y piritita.

Núcleo J6. Comparando el resultado con la Fig. 26, el comportamiento de la roca es de tipo frágil para el nivel de confinamiento aplicado de máximo 8 MPa (Fig. 29); con una tendencia lineal (positiva) hasta su resistencia máxima (156,3 MPa) y su resistencia residual (135,3 MPa).

Las rocas con estas características son generalmente de alta resistencia y la falla durante la aplicación de las cargas se produce solo a través de un plano definido. El módulo de Young de la roca es de 25 GPa.

Rotura. En términos generales el núcleo presenta un grado medio fracturamiento, donde la rotura se da por un plano en diagonal y aleatorio (Fig. 30); en la superficie de falla presenta mineralización en piritita diseminada y carbonatos. En la base del núcleo se desarrollaron dos fracturas semicirculares.

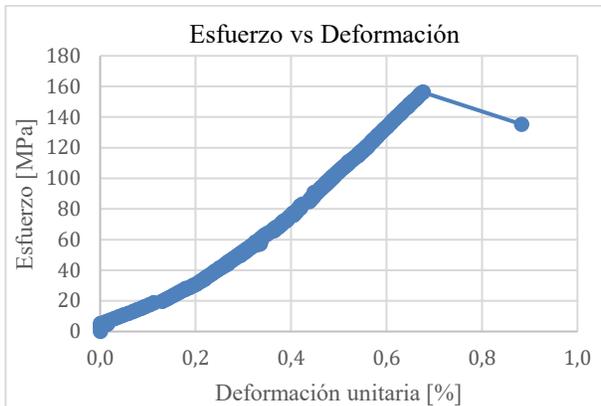


Figura 29. Curva esfuerzo deformación, confinamiento 5 MPa. Fuente: Los Autores



Figura 30. Núcleo de roca intacto y después del ensayo de compresión triaxial. Fuente: Los Autores

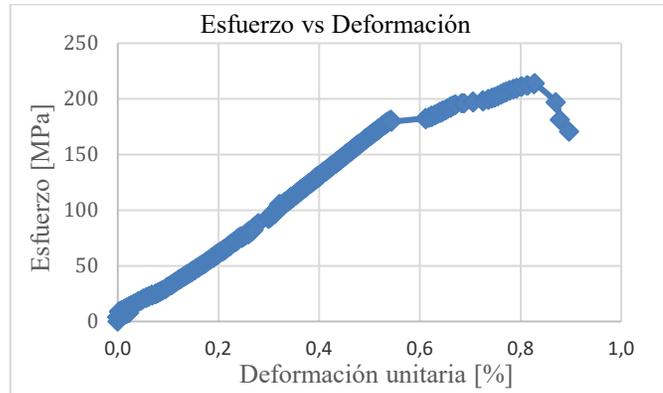


Figura 31. Curva esfuerzo deformación, confinamiento 8 MPa. Fuente: Los Autores

Núcleo J9N1. Con una resistencia máxima de 213 MPa y residual de 170 MPa, se tiene que la roca tiene tres etapas de fallamiento. La primera etapa ocurre con un valor de 177 MPa, la segunda a 194 MPa y la final a 213 MPa. Su comportamiento es frágil- dúctil, de acuerdo con la Fig. 26. El módulo de Young de la roca es 33 GPa.

Rotura. El núcleo presenta alto grado de fracturamiento. La falla se da en un plano en diagonal que corta la mineralización semiparalela al eje principal del núcleo (Fig. 31). También se encontraron fisuras desarrolladas en los extremos del núcleo. Su fractura se da en forma astillosa siguiendo venillas mineralizadas de menor longitud. El plano de falla presenta mineralización de carbonatos diseminados con algunos cristales de magnetita y piritita levemente alterados.

Núcleo J3N1. El comportamiento de la roca presenta una tendencia similar a la del núcleo J9N2; es decir, de tipo dúctil-frágil. Sin embargo, desde los 126 MPa se observan algunos quiebres en la curva, registrando algún tipo fallamiento inicial y posterior compresión en busca de soportar aún más la carga axial hasta llegar a una resistencia residual de 89 MPa (Fig. 32). El módulo de Young obtenido es 25 GPa.

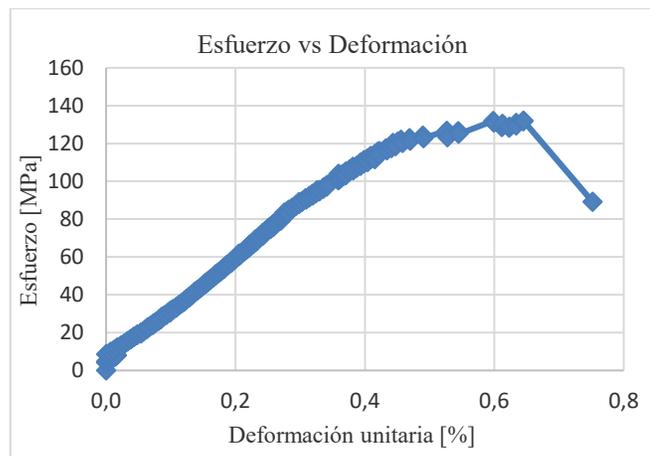


Figura 32. Curva esfuerzo deformación, confinamiento 8 MPa. Fuente: Los Autores



Figura 33. Núcleo de roca antes (intacto) y después del ensayo de compresión triaxial.

Fuente: Los Autores

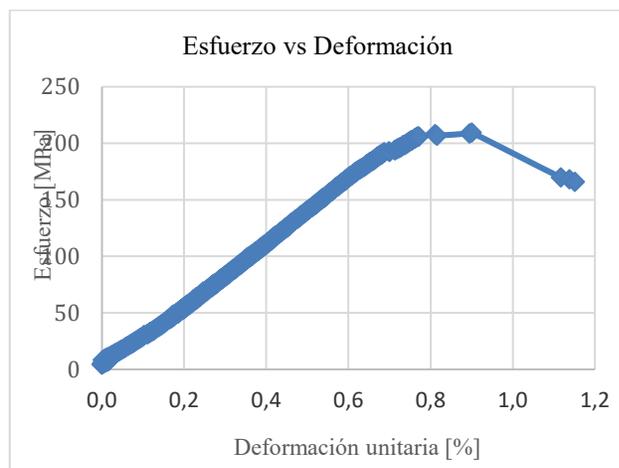


Figura 34. Curva esfuerzo deformación, confinamiento 8 MPa.

Fuente: Los Autores

Rotura. Se da por medio de dos fracturas. La primera (principal) en diagonal de forma ondulada a través de todo el núcleo. La segunda fractura se da en el borde superior, en forma de cuña hasta la mitad del núcleo. Según se aprecia, la fractura está influenciada por una venilla de pirita (Fig. 33). El núcleo se conserva sin mayor fracturamiento y el plano de falla presenta mineralización de pirita.

Núcleo J7. El fallamiento de la roca se produjo a través de dos planos de debilidad formados por la presencia de venillas con carbonatos en los extremos. La resistencia pico es 208 MPa y su comportamiento tiende a ser frágil (Fig. 34). El módulo de Young obtenido es 27 GPa.

Rotura. Como se aprecia en la fotografía, los planos de falla generados por la carga aplicada presentan forma diagonal en la parte superior e inferior del núcleo. Estos planos corresponden a venillas de carbonatos (Fig. 35).

En su estructura, el núcleo solo presenta pequeñas fisuras en los extremos. La matriz rocosa, en general, se conserva intacta.



Figura 35. Núcleo de roca antes (intacto) y después del ensayo de compresión triaxial.

Fuente: Los Autores

5. Conclusiones

El macizo rocoso tiene una calidad media a muy buena según la clasificación de Barton et al. (1974). El sostenimiento sugerido, entonces, es de pernado localizado o sin sostenimiento. Para el sistema RMR (Bieniaswski, 1989) los valores se encuentran entre tipo III (media) y tipo II (buena) y, finalmente, el valor del Índice Geológico de Resistencia GSI (Hoek and Brown, 1977) para el macizo rocoso está entre 45 % y 55 %, según la valoración general de las discontinuidades presentes. Si se utiliza la ecuación $GSI = RMR_{89} - 5$ este valor está entre 42 % y 56 % (Hoek et al., 1995).

La velocidad de ondas P obtenida en el laboratorio representa un 70 % a 80 % de la velocidad teórica. Esta atenuación se debe, entre otras cosas, a la presencia de estructuras y/o discontinuidades en los núcleos, influyendo directamente en la aproximación de la resistencia a la compresión uniaxial (Tabla 8) y los índices de continuidad de la Tabla 5, los cuales están entre continuidad fuerte a continuidad media.

Durante la caracterización petrográfica se encontró una variación litológica entre rocas basálticas de color verdoso, andesita, dioritas y una especie de brecha. En sección delgada se encontró que la coloración verde en las rocas se debe a un alto grado de alteración de los minerales principales como la plagioclasa y anfíboles, los cuales se encuentran zonificados, con algunos bordes irregulares y con reemplazamiento total o parcial por clorita, epidota y carbonatos.

Para el ensayo de carga puntual se obtuvieron dos resultados: el primero comprende fallamiento a través de planos de debilidad creados por la mineralización de sulfuros en forma de venillas paralelas visibles con espesor de hasta 1 mm, y el caso 2 de fallamiento comprende estructuras que no son visibles a simple vista en el núcleo, pero que su geometría está determinada por mineralización de pirita de forma irregular.

El comportamiento de las curvas de esfuerzo y deformación resultado de los ensayos triaxiales arroja una tendencia que tiende a ser dúctil. Esto se debe a que la compresión en la celda va cerrando las diferentes grietas encontradas a lo largo del núcleo, fallando paulatinamente a medida que la carga axial aumenta, dando aspecto de escalones.

Al analizar los datos de los ensayos triaxiales mediante RocData se tuvo que, para la roca tipo diorita, brecha y andesita, la resistencia a la compresión simple estuvo en 130 MPa, con lo cual las aproximaciones de la [Tabla 8](#) tienen un buen acercamiento.

Los planos de falla en los núcleos durante el ensayo de compresión triaxial presentan ángulos entre 60° y 80° con excepción del núcleo J7, donde los extremos presentan dos diagonales a 45° ([Fig. 35](#)).

El común denominador de las superficies de ruptura se asocia a mineralización de sulfuros como piritita y presencia de carbonatos diseminados; algunos núcleos desarrollan fracturas semicirculares en los extremos, junto con abombamiento y algunas fracturas paralelas a venillas. En el caso particular de J7 la matriz rocosa permanece intacta.

En términos generales la calidad del macizo no refleja la posible anisotropía generada en las rocas mineralizadas, lo cual es consecuencia del efecto escala. Sin embargo, la influencia de la mineralización es bastante notoria en la aplicación de esfuerzos para los ensayos de carga puntual y compresión triaxial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los profesores y monitores del Laboratorio de Geotecnia e Ingeniería de rocas de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, y al ingeniero de minas y metalurgia Carlos Mario Vargas que, junto con todo el equipo de geomecánica de la compañía *Continental Gold*, colaboraron en el desarrollo de este trabajo. Finalmente, los autores agradecen a los evaluadores anónimos por sus comentarios y recomendaciones que permitieron mejorar el manuscrito original.

Referencias

ASTM D2664-95a 1995 (Jan). Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements. PA: ASTM International, International Standard (Philadelphia).

ASTM D5731-16, 2016. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock, Application to Rock Strength Classifications. PA: ASTM International, International Standard (Philadelphia).

Azimian, A., Ajalloeian, R. and Fatehi, L., 2014. An empirical correlation of uniaxial compressive strength with P-wave velocity, point load strength index on marly rocks using statistical method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, pp. 205-214. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9703-x>

Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock*

Mechanics, 6, pp. 189-236. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01239496>

Bieniaswski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers, geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: John Wiley and Sons.

Correa, T., Zapata, J.P., Obando, M., Rincón, A., Cetina, L. y Ortiz, F. (2018). *Geología del borde occidental de la Plancha 130-I Escala 1:50.000*. Servicio Geológico Colombiano.

Correa, T., Obando, M., Zapata, J.P., Rincón, V., Ortiz, F., Rodríguez, G. y Cetina, L. (2018). *Memoria explicativa de la Geología del borde occidental de la plancha 130 – Santa Fe de Antioquia. Escala 1:50.000*. Servicio Geológico Colombiano.

Dobrin, M.B., 1960. *Introduction to geophysical prospecting*. McGraw Hill Company: New York.

Goktan, R.M. 1988. *Theoretical and practical analysis of rock rippability*, Ph.D. Thesis. Istanbul Technical University.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

Hoek, E. y Brown, E.T. 1977. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), pp. 1165-1186.

Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. A.A. Balkema: Rotterdam.

Jones, I., 2019, *Continental Gold, NI 43-101 Buritica Mineral Resource 2019-1*. Technical Report.

Osinergmin, 2017 (Jun). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Inversiones Iakob: Lima (Perú).

Ramírez-Oyanguren, P. y Alejano-Monje, L., 2004. *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Universidad de Vigo (ETSI Minas): Pontevedra, Galicia.

Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P. and Hatzipanagiotou, K., 2011. Microcracks in ultrabasic rocks under uniaxial compressive strength. *Engineering Geology*, 117, pp. 104-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.010>

Sarkar, K., Vishal, V. and Singh, T.N., 2012. An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, pp. 469-479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9481-2>

Sharma, P.K. and Singh, T.N., 2008. A correlation between P-wave velocities, impact strength index, slake durability index, uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, pp. 17-22. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-007-0109-y>

Turgul, A. and Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51, pp. 303-317. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00071-4)

Yagiz, S. 2011 (Jul). P-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials. *Bulletin of Materials Science*, 34(4), pp. 947-953. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0220-3>

J.S. Acosta-Luna, es Ing. Geólogo e Ing.de Minas y Metalurgia de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente se encuentra vinculado como geólogo del área de formalización de Zijin-Continental Gold, donde se encarga de dar apoyo técnico a las diferentes formalizaciones de la zona de influencia de la Mina Buriticá, Antioquia.
ORCID: 0000-0001-9360-5751.

L.O. Suarez-Burgoa, es PhD en Geotecnia de la Universidad de Brasilia (UnB). Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Desarrollador de códigos computacionales en lenguajes Matlab 11 (Octave 4.X) y Python3.X, en temas relacionados a la geología aplicada y geotecnia. Es director del semillero de investigación en geología matemática (<http://geomecanica.org>).
ORCID: 0000 0002 9760 0277.

A.J. Castro-Caicedo, es Ing. de Minas, Ph.D. de la Universidad Politécnica de Madrid con líneas de trabajo en ingeniería de rocas, explotación minera, diseño, modelación y construcción de obras geotécnicas en superficie y subterránea; es coordinador del Laboratorio de Ingeniería de Rocas y docente de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
ORCID 0000-0002-3653-7753.

J.M. Molina-Escobar, es Ing. de Minas y Metalurgia, Ph.D en Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Cataluña. Desarrolla proyectos de investigación en seguridad minera, economía y ambiente, patrimonio minero y geoquímica ambiental. Profesor e investigador a tiempo completo en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
ORCID 0000-0002-6068-2571.
