

Calidad geotécnica en los sectores El Playón, Mapasingue y La Pista, distrito minero Nambija

Geotechnical rank in the The Playón, Mapasingue and The Pista sectors, Nambija Mining District

Fernanda Dayana Andrade Mantilla^{1,a}, Diego Mauricio Alquinga López^{1,b}

Recibido: 01/02/2023 - Aprobado: 02/03/2023 – Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

La investigación está fundamentada en la calificación geomecánica del macizo rocoso, en las labores mineras subterráneas de la concesión Asonambile (distrito minero Nambija), mediante la valoración Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989) y el índice Q de Barton & Choubey (1977), considerando la correlación empírica para la obtención del índice GSI de Hoek et al. 2002), que permitieron definir parámetros geomecánicos y con ello, el comportamiento y calidad geotécnica de 2.473 m. lineales de galerías subterráneas. Los parámetros geomecánicos, señalan que las labores mineras localizadas hasta 50 m de profundidad respecto a la superficie, presentan un riesgo mínimo de estallido de roca; mientras que, aquellas ubicadas desde los 100 m, presentan fenómenos de estallidos violentos, provocando inestabilidad en el contorno de la excavación. Ensayos geotécnicos de laboratorio, llevados a cabo entre los años 2010 y 2014 por el Instituto Nacional de Investigación Geológica, Minero y Metalúrgico (actual Instituto de Investigación Geológico y Energético), como parte de varios proyectos en el distrito minero Nambija, han sido considerados para extrapolación y cotejo con las valoraciones geomecánicas de esta investigación, además de permitir la calibración de un modelo geológico del sector. El presente estudio además prevé un sistema de sostenimiento sustentado en la valoración Q de Barton.

Palabras claves: RMR de Bieniawski, índice Q de Barton, índice GSI de Hoek, Distrito minero Nambija, Ensayos geotécnicos.

ABSTRACT

The research is based geomechanical qualification of rock mass, in the underground mining works of the Asonambile Concession (Nambija Mining District), through the Bieniawski's RMR system (1989) and the Barton's Q index (2000) in addition to the empirical correlations to determine the Hoek's GSI index (2002), which allowed defining the geomechanical parameters and with it, the behavior and geotechnical quality of 2,473 linear meters of underground galleries. The geomechanical parameters indicate that mining works located up to 50 m deep from the surface, present a minimal risk of rock bursting; while those located from 100 m, present violent rock bursting, causing instability. Geotechnical tests "in situ" and laboratory, carried out between 2010 and 2014 by the Instituto Nacional de Investigación Geológica, Minero y Metalúrgico (current Instituto de Investigación Geológico y Energético), as part of several projects in the Nambija Mining District, have been considered for extrapolation and comparison with the geomechanical evaluations of this research; in addition to allowing the calibration of a geological model of sector. Besides, the present study foresees an empirical support system based on the Barton's Q.

Keywords: Bieniawski's RMR, Barton's Q index, Hoek's GSI index, Nambija Mining District, Geotechnical tests.

1 Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito, Ecuador.

a Geóloga. Autor para correspondencia: fernanda.andrade@geoenergia.gob.ec - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2733-2171>

b Geólogo. E-mail: diego.alquinga@geoenergia.gob.ec - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5227-4722>

I. INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra localizada al suroriente del Ecuador, en el cantón Zamora, provincia de Zamora Chinchipe, específicamente en la cordillera Nanguipa, ramal que se forma entre las cordilleras Real y El Cóndor, a 34 km de la ciudad de Zamora y a 8 km de la población de San Carlos de las Minas. Se puede acceder por la Troncal Amazónica E45, desde el norte, atravesando los poblados de Macas, San Juan Bosco, Yantzaza; desde el sur, por la ciudad de Zamora y la población de San Carlos de las Minas (Figura 1).

La explotación minera en el distrito minero Nambija inició a finales del siglo XVI e inicios del XVII. Hasta su redescubrimiento en 1981, con una explotación antitécnica, con la construcción de gigantescas cavernas generando inestabilidad del macizo rocoso. Actualmente, la explotación minera se caracteriza por la rehabilitación de antiguas labores mineras y la construcción de otras nuevas

con el objetivo de extraer el material aurífero remanente en la zona.

En esta investigación, se realizó el análisis de calidad geotécnica de 6 labores mineras subterráneas ubicadas en los sectores de El Playón, Mapasingue y La Pista, pertenecientes a la concesión Asonambile (distrito minero Nambija), las cuales se desarrollan en su mayoría en macizos rocosos de calidad geotécnica media y mala (Tabla 1).

II. II. MÉTODOS

El proceso de investigación para la determinación de la calidad geotécnica del macizo rocoso en los sectores de El Playón, Mapasingue y La Pista, de la concesión minera Asonambile (distrito minero Nambija), contempla 5 fases de desarrollo:

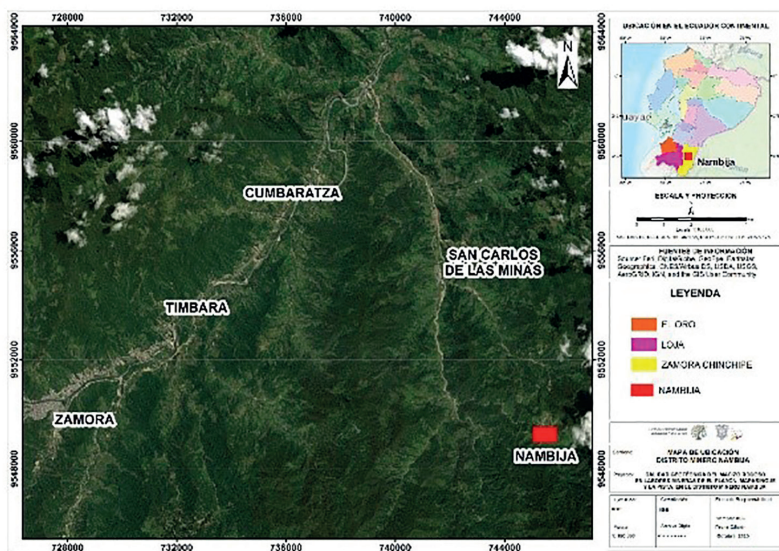


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, distrito minero Nambija
Fuente: (IIGE, 2019)

Tabla 1. Cantidad en metros lineales de galerías / túnel de las labores mineras subterráneas investigadas y longitud de la calidad geomecánica del macizo rocoso

Labor minera	Calidad de roca Tipo de roca Longitud (m)	Clasificación geomecánica del macizo rocoso				
		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
		I	II	III	IV	V
		Metros lineales (m)				
Peñasco	419	9	0	267	143	0
Arenisca	459	12	71	241	110	25
Manantial	357	0	0	197	160	0
Mineritos de la pista	348	0	0	102	246	0
Macas	714	0	0	424	290	0
Mateos	176	0	0	170	6	0
Total	2473	21	71	1401	955	25

Fuente: Elaboración propia

- a. Recopilación de investigaciones geotécnicas indirectas y directas efectuadas al terreno, para evaluar propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso alrededor de las labores mineras.
- b. Calificación o valoración geomecánica del macizo rocoso al interior de las labores mineras subterráneas: Peñasco, Manantial, Los Mineritos de la Pista, Mateos, Macas y Arenisca, con la aplicación del sistema de valoración RMR (Bieniawski, 1989) y el índice Q de Barton (Barton & Choubey, 1977)
- c. Determinación del índice GSI (Hoek et al, 2002) (INIGEMM, 2013), a partir de la definición de los valores RMR e índice Q del macizo rocoso, mediante ecuaciones de correlación matemática.
- d. Análisis de la resistencia y comportamiento deformacional del macizo rocoso, estableciendo parámetros como resistencia al corte de discontinuidades, resistencia y deformabilidad del macizo rocoso.

Preliminarmente a estas etapas se realizó un levantamiento geológico de superficie para la identificación de unidades litológicas en el área de estudio; se definió 9 unidades que se describen en la Tabla 2.

2.1. Investigaciones geotécnicas indirectas y directas

El Instituto Nacional de Investigación Geológica, Minero, Metalúrgico (INIGEMM) (actual Instituto de Investigación Geológica y Energético (IIGE)), entre 2010 y 2014 ejecutó investigaciones en el terreno para diversos proyectos de estudio en el área del distrito minero Nambija (INIGEMM, 2013).

En el presente estudio, se recopiló dicha información de investigaciones directas, correspondiente a ensayos de compresión simple y triaxiales para rocas, en muestras tomadas de núcleos de perforación exploratoria. Así mismo se recopiló información de investigaciones indirectas, concerniente a prospección geofísica mediante sísmica de refracción.

2.2. Calificación geomecánica del macizo rocoso

La calidad geotécnica del macizo rocoso en las labores mineras subterráneas de El Playón, Mapasingue y La Pista se fundamentó en la valoración de las características y propiedades de la matriz rocosa y discontinuidades que integran los macizos rocosos, mediante la aplicación del índice RMR (Rock Mass Rating) definido por Bieniawski y el índice Q propuesto por Barton.

El sistema o índice RMR de Bieniawski considera varios parámetros geomecánicos de los macizos rocosos para su calificación en una escala de 0 a 100 puntos, según

Tabla 2. Unidades litológicas presentes en el área de estudio de la concesión minera Asonambile

Unidades litológicas		
Unidad	Litología	Descripción
I	Tobas ácidas argilizadas (saprolito)	Comprende una roca completamente meteorizada debido principalmente a alteración argílica avanzada probablemente en tobas ácidas, observables en ciertas zonas donde conserva su textura y estructura.
II	Skarn cuarzo-epidota	Corresponde a una secuencia masiva de rocas skarnificadas y silicificadas de color gris verdoso claro, con mineralizaciones de sulfuros diseminados (pirita, calcopirita) en matriz rocosa y vetillas de cuarzo.
III	Tobas ácidas de grano fino a medio (unidad superior)	Constituye una secuencia estratificada en capas centimétricas a decimétricas, con rumbo de estratificación N45°E y buzamiento al NO, con un grado medio de meteorización; comprende tobas de grano fino a medio, de color gris verdoso claro, que intercalan con areniscas de grano medio. Estas tobas presentan silicificación y epidotización, además de inclusiones de cuarzo lechoso de formas subredondeadas. Presencia de mineralizaciones de sulfuros diseminados (pirita, calcopirita) en matriz rocosa y vetillas de cuarzo.
IV	Tobas de clastos – tobas de grano grueso	Son tobas de clastos silicificadas de coloración gris verdosa, de textura clástica, con una meteorización media, presencia de cristaloclastos de plagioclasa y cuarzo, de formas angulosas y subangulosas.
V	Tobas ácidas de grano fino	Corresponde a una secuencia masiva de tobas ácidas de color gris verdoso claro a blanco, de grado medio de meteorización, textura clástica de grano fino, con cristales de formas subredondeadas, dispuestos en una matriz de grano fino. Presencia de mineralizaciones de sulfuros diseminados (pirita) en matriz rocosa y vetillas de cuarzo, además de un alto grado de silicificación, cloritización y epidotización.
VI	Tobas ácidas de grano fino a medio (unidad inferior)	Comprende una secuencia de tobas de color crema claro, de textura clástica de grano fino a medio, presenta alto grado de silicificación y epidotización. Estas rocas se intercalan en capas finamente estratificadas de diferentes tonalidades de crema claro a oscuro, de rumbo N45°E y buzamiento al SE.
VII	Toba andesítica silicificada	Toba de matriz soportada, presenta estructura masiva, coloración gris verdosa, de grado medio de meteorización, textura clástica de grano medio, con cristaloclastos de plagioclasa y hornblenda, de tamaños milimétricos y formas subangulosas a subredondeadas, soportados en una matriz fina. Presencia de mineralizaciones de sulfuros diseminados (pirita, calcopirita) en matriz rocosa y vetillas de cuarzo, además de un alto grado de silicificación de la roca.
VIII	Arenisca tobácea silicificada	Roca clástica de estructura masiva, coloración gris verdosa, con alto grado de meteorización, textura clástica de grano grueso, con cristales de plagioclasa y cuarzo de formas angulosas a subangulosas. Presencia de mineralizaciones de sulfuros diseminados (pirita) en matriz rocosa y vetillas de cuarzo, además de una leve epidotización.
IX	Intrusivo granodiorítico	Intruye a la Unidad IV como un dique de estructura masiva, de color gris claro verdoso, de bajo grado de meteorización, que corresponde a un pórfido granodiorítico silicificado, con cristales de plagioclasa y hornblenda, además cuarzo. Presencia de mineralizaciones de sulfuros diseminados (pirita).

Fuente: Elaboración propia

la ponderación de los mismos. Estos parámetros básicos son:

- a. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- b. Grado de fracturación en términos del %RQD.
- c. Espaciado de las discontinuidades.
- d. Condiciones de las discontinuidades (rugosidad, rellenos, alteración).
- e. Condiciones hidrogeológicas.
- f. Orientación de las discontinuidades con respecto a la orientación de la excavación.

La apreciación cuantitativa de estos parámetros a lo largo de las labores mineras subterráneas permitió efectuar una zonificación o sectorización de acuerdo con las calificaciones obtenidas de RMR que establecen una clase y calidad geomecánica determinada, para los macizos rocosos evaluados. A continuación, en la Tabla 3, se exponen la zonificación por abscisas de la labor minera Mateo, mostrando la clase y calidad geomecánica.

Por otra parte, la calificación geomecánica del macizo rocoso al interior de las labores mineras subterráneas mediante la aplicación del índice Q de Barton, implica la evaluación cuantitativa de 6 parámetros o propiedades que se expresan mediante la siguiente ecuación (Eq. 1):

$$(Eq. 1) \quad Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde,

RQD= Designación de la calidad de roca (grado de fracturación).

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

J_r= Índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.

J_a= Índice de alteración de las discontinuidades.

J_w= Coeficiente reductor por la presencia de agua.

SRF= (Stress Reduction Factor). Coeficiente que considera la influencia del estado tensional.

Dependiendo de la valoración del índice Q, que varía en escala logarítmica desde 0.0001 a un máximo de 1000, Barton designa una calidad geotécnica. A continuación, en la Tabla 4, se expone la zonificación por abscisas de la labor minera Mateo, en calidad geomecánica según la calificación Q de Barton.

2.3. Determinación del índice GSI (Geological Strength Index)

En este estudio, con la finalidad de obtener parámetros de resistencia y deformación general del macizo rocoso que complementen la caracterización geomecánica al interior de las labores mineras subterráneas El Playón, Mapasingue y La Pista, de la concesión minera Asonambile, se procedió a determinar el índice GSI en base a correlaciones matemáticas con el índice RMR y el índice Q, los cuales fueron definidos por caracterización y cuantificación. Para ello, se empleó la siguiente ecuación Eq. 2 de correlación descrita por Barton en 1995:

$$(Eq. 2) \quad GSI \approx 9 \cdot \ln Q + 44$$

Si $GSI \geq 35$, considerando condiciones secas y estado tensional de magnitud moderada.

De igual forma, para obtener el índice GSI en base al índice RMR, se utilizó la ecuación Eq. 3 descrita por Barton en 1995, la cual se reemplazó en la ecuación Eq. 2 y se

Tabla 3. Zonificación geomecánica de la labor minera Mateo en base al índice de calificación RMR

Zonificación geomecánica - labor minera Mateo							
Grupo	Nivel	Dirección de túnel	Abscisa		Valoración macizo rocoso		
			Inicial	Final	RMR	Clase	Calidad
G1	Mateos	120° N	0+000	0+065	43	III	Media
		215° N	0+006	0+012	46	III	Media
G3	I	90° N	0+096	0+102	42	III	Media
		Crucero I	125° N	0+000	0+009	42	III

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Zonificación geomecánica de la labor minera Mateo en base al índice de calificación Q

Zonificación geomecánica - labor minera Mateo						
Grupo	Nivel	Dirección de túnel	Abscisa		Valoración macizo rocoso	
			Inicial	Final	Índice Q	Calidad
G3	I	215° N	P36	0+006	1.14	Mala

Fuente: Elaboración propia

obtuvo la ecuación Eq. 4 y el índice GSI, correlacionándolo así con el índice RMR y el índice Q.

$$(Eq. 3) \quad Q \approx 10^{\frac{RMR-50}{15}}$$

$$(Eq. 4) \quad GSI \approx 9 \cdot \ln \left[10^{\frac{RMR-50}{15}} \right] + 44$$

En la Tabla 5 se muestran los índices GSI de la labor minera Mateo, calculados a partir de las calificaciones RMR y Q, y su zonificación por abscisas, procedimiento que fue aplicado para cada una de las labores mineras en estudio.

2.4. Análisis de la resistencia y comportamiento deformacional del macizo rocoso

El comportamiento geomecánico del macizo rocoso está en función de su resistencia y deformabilidad, además de otros factores extrínsecos al material rocoso como las condiciones hidrogeológicas, estado tensional, entre otros.

En el presente estudio, se efectuó el análisis de estos parámetros, resistencia y deformabilidad, según las unidades litológicas identificadas en las labores mineras subterráneas de la concesión minera Asonambile (distrito minero Nambija) y de acuerdo con su índice de calidad geotécnica.

De esta forma, al interior de las labores mineras subterráneas se definieron 4 unidades litológicas, de un total de 9 unidades identificadas por levantamiento geológico de superficie en toda el área de la concesión minera; así mismo se discriminó el análisis de resistencia y deformabilidad para los macizos rocosos de calidad geomecánica media (Tipo III) y de calidad geomecánica mala (Tipo IV).

2.4.1. Resistencia del macizo rocoso

La resistencia del macizo rocoso está definida por:

- Resistencia de la matriz rocosa.
- Resistencia al corte de las discontinuidades del macizo rocoso.

Para el presente estudio, se aplicó el criterio de rotura de Hoek & Brown (Hoek & Carranza -Torrez, Hoek-

Brown failure criterion, 2002), que constituye la base de los métodos empíricos de análisis del parámetro de resistencia de la matriz rocosa, a partir de la evaluación de los esfuerzos actuantes y de las propiedades intrínsecas de la roca como tal.

De esta forma, mediante la aplicación de la ecuación Eq. 5 de Hoek & Brown, y asumiendo $\sigma_3 = 0$ para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso y $\sigma_1 = 0$, para la determinación de la resistencia a la tracción en dicha ecuación, se obtienen las ecuaciones Eq. 6 y Eq. 7 respectivamente.

$$(Eq. 5) \quad \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Dónde,

σ_1, σ_3 = Esfuerzos principales mayor y menor de rotura.

σ_{ci} = Resistencia de la roca intacta.

m_b, s, a = Constantes de Hoek & Brown del macizo rocoso; para roca intacta: $m_b = m_i$, $s = 1$, $a = 0.5$.

$$(Eq. 6) \quad \sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a$$

$$(Eq. 7) \quad \sigma_t = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

Para el cálculo y análisis tanto de esfuerzos como de las constantes del macizo rocoso de forma automatizada, se hizo uso del software RocData 3.013, el cual se basa en los principios de rotura de Hoek & Brown, así como en el criterio de Mohr-Coulomb, que además permite determinar el ángulo de fricción interna (ϕ) y cohesión (C) como parámetros que definen el carácter friccionante o resistente del macizo rocoso.

En la Tabla 6, se exponen los resultados de análisis de resistencia de la matriz rocosa para cada una de las 4 unidades litológicas definidas en las labores mineras y según sus calidades geomecánicas.

Por otra parte, la resistencia al corte de las discontinuidades se determinó en base al criterio de (Choubey & Barton, 1977) a partir de datos bibliográficos y de los ensayos de compresión simple y triaxiales recopilados de las investigaciones directas ejecutadas por el ex-INIGEMM (INIGEMM, 2013) (Tabla 3) en la zona de estudio.

Tabla 5. Zonificación geomecánica de la labor minera Mateo por cálculo del índice GSI

Zonificación geomecánica - labor minera Mateo						
Grupo	Nivel	Dirección de túnel	Abscisa		Valoración macizo rocoso	
			Inicial	Final	GSI	Calidad
G1	Mateos	120° N	0+000	0+065	34	Mala
		215° N	P36	0+006	45	Media
G3	I	215° N	0+006	0+012	38	Mala
		90° N	0+096	0+102	33	Mala
		Crucero I	0+000	0+009	33	Mala

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Parámetros geomecánicos resistentes de los macizos rocosos en las labores mineras subterráneas

Parámetros resistentes de macizos rocosos en base a su matriz rocosa									
Litología	Clase	Matriz rocosa			Parámetros resistentes				
		σ_{ci}	Peso específico	s	a	mb	Cm	ϕ_m	
		MPa	MN/m ³						MPa
Tobas ácidas	III	72	0.0237	0.0022	0.5068	1.5300	2.7	0.622	52
	IV	65	0.0213	0.0002	0.5157	0.7415	0.9	0.362	45
Skarn QZ-Epidota	III	11.2	0.0255	0.0012	0.5071	1.6181	0.3	0.311	38
	IV	9.8	0.0223	0.0002	0.5158	0.8798	0.1	0.203	32
Tobas de clastos	III	61	0.0276	0.0010	0.5076	1.0418	1.7	0.484	48
	IV	57	0.0246	0.0002	0.5163	0.5947	0.7	0.356	42
Tobas andesíticas	III	82	0.025	0.0015	0.5068	1.6393	2.8	0.671	53
	IV	73	0.0237	0.0002	0.5187	0.7594	0.8	0.4	46

Fuente: Elaboración propia

Así, el criterio de resistencia al corte viene dado por la expresión de la ecuación Eq. 8:

$$(Eq. 8) \quad \tau = \sigma'_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_r \right]$$

Dónde,

$\tau - \sigma'_n$ = Esfuerzos tangencial y normal sobre el plano de discontinuidad.

ϕ_r = Ángulo de rozamiento residual.

JRC= Coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (Joint roughness coefficient).

JCS= Resistencia al esfuerzo de compresión de las paredes de la discontinuidad (Joint Wall compression strength).

Para la determinación de los diferentes parámetros de la ecuación, igualmente se empleó el software RocData 3.013, así como los datos de caracterización geomecánica de los macizos rocosos, como familias de discontinuidad y estado de las mismas, recabados en el levantamiento de mapeo subterráneo mediante el índice RMR.

En la Tabla 7, se muestran los valores de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ), que corresponden a las propiedades

geomecánicas de las discontinuidades, agrupándolos para este caso a las 4 unidades litológicas en 2 litotipos: tobas y skarn.

2.4.2. Deformabilidad del macizo rocoso

La deformabilidad de la roca se expresa por sus constantes elásticas:

- Módulo de Young (E)
- Coeficiente de Poisson (ν)

El módulo de Young (E), define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo.

El coeficiente de Poisson (ν), define la relación entre la deformación transversal y la axial.

Para la determinación del módulo de deformación del macizo rocoso, se emplearon las ecuaciones Eq. 9 y Eq. 10 [3].

$$(Eq. 9) \quad Em (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$

$$(Eq. 10) \quad Em (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$

Tabla 7. Parámetros geomecánicos resistentes de las discontinuidades de los macizos rocosos tobáceos y de skarn en las labores mineras subterráneas

Parámetros resistentes de las discontinuidades de macizos rocosos						
Roca	Parámetros resistentes			Parámetros resistentes		
Litología	Peso específico	ϕ_r	JRC	JCS	C	ϕ
	MN/m ³				MPa	(°)
TOBAS	0.0238	31	9	75	0.112	44
SKARN	0.0255	36	7	15	0.076	41

Fuente: Elaboración propia

La ecuación Eq. 9, se emplea cuando $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa; mientras que para $\sigma_{ci} \geq 100$ MPa, se emplea la ecuación Eq. 10.

En la Tabla 8, se presentan los valores de cálculo del módulo de formación de los macizos rocosos para cada una de las 4 unidades litológicas definidas en las labores mineras y según sus calidades geomecánicas.

III. RESULTADOS

En la presente investigación con los análisis de campo, ensayos de laboratorio y procesamiento de datos en programas geotécnicos especializados, se obtuvieron los parámetros geomecánicos de cada litotipo identificado en el área de la concesión Asonambile a una profundidad promedio de galería de 100 m los cuales deben ser calibrados con nuevas campañas de investigaciones geotécnicas en el sector.

3.1. Parámetros geomecánicos del macizo rocoso

Levantamientos geológicos en superficie, investigaciones directas al terreno e investigaciones en subterráneo, permitieron identificar que las galerías que atraviesan

4 litotipos, cuyos parámetros para macizos de calidad geotécnica media (Tipo III) y calidad geotécnica mala (Tipo IV) se presenta en la Tabla 9, procedimiento que fue utilizado para las demás unidades litológicas.

3.2. Parámetros geomecánicos de las discontinuidades

Los valores obtenidos fueron procesados como se explica en el apartado 6.4, para rocas agrupadas en dos grupos generales, Tobas y Skarn. En la Tabla 10, se muestran los resultados.

3.3. Parámetros de estabilidad del macizo rocoso (Squeezing – Rock Bursting)

Las condiciones de alta tensión *in situ*, junto con la presencia de discontinuidades pueden llegar a provocar fenómenos como rockburst, squeezing u otros problemas de estabilidad inducidas por los esfuerzos generados en el macizo rocoso (Selmer-Olsen & Broch, 1978).

Para el caso de este estudio, se ha tomado como base el análisis para el macizo rocoso de calidad geotécnica media (Tipo III) y mala (Tipo IV), en labores mineras con una profundidad de hasta 100 m desde la superficie, en las cuales se debe tener en cuenta la estabilidad de la excavación, con

Tabla 8. Valores de los módulos de deformación de los macizos rocosos en las labores mineras subterráneas

Litología	Clase	Módulo de deformación de los macizos rocosos		
		σ_{ci} MPa	Matriz rocosa	Módulo de deformación
			Peso específico MN/m ³	E GPa
Tobas ácidas	III	72	0.0237	6.8
	IV	65	0.0213	2.8
Skarn QZ-Epidota	III	11.2	0.0255	2.3
	IV	9.8	0.0223	1.1
Tobas de clastos	III	61	0.0276	5.0
	IV	57	0.0246	2.5
Tobas andesíticas	III	82	0.025	6.7
	IV	73	0.0237	2.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Parámetros geomecánicos obtenidos para un macizo rocoso de tobas ácidas

Clase	Tobas ácidas								
	Matriz rocosa			Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso					
	σ_{ci} MPa	Peso específico MN/m ³	s	a	mb	σ_c MPa	cm MPa	ϕ_m °	E GPa
III	72	0.0237	0.0022	0.5068	1.5300	2.7	0.622	52	6.8
IV	65	0.0213	0.0002	0.5157	0.7415	0.9	0.362	45	2.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Parámetros mecánicos obtenidos para discontinuidades que afectan al macizo Tobáceo y Skarn

	ϕ_r	JRC	JCS	Peso específico (MN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)
Tobas	31	9	75	0.0238	0.112	44.00
Skarn	36	7	15	0.0255	0.076	41.23

Fuente: Elaboración propia

el objetivo de que los trabajos en subterráneo se generen de manera segura, tanto para el personal como para la maquinaria.

3.3.1. Cálculo de Squeezing

La comisión sobre Squeezing Rocks in Tunnels, de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) (Barla, 1995), define el fenómeno como: "...gran deformación que ocurre alrededor de un túnel o excavación subterránea, asociada básicamente a la fluencia (creep) causada por tensiones que superan la resistencia a esfuerzo cortante. La deformación puede producirse durante la construcción o continuar durante un tiempo...".

Para la estimación del grado de Squeezing, se adoptó el criterio de Hoek & Marinos (Hoek & Marinos, *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*, 2001), que utiliza el criterio empleado por Barla (Barla, 1995), mediante la Eq. 11:

$$(Eq. 11) \frac{\sigma_c}{p_o}$$

Donde:

σ_c = Resistencia a compresión del macizo rocoso.

$p_o = \gamma \cdot Z$ = Tensión

γ = Peso específico de la roca suprayacente.

Z = Cobertera del terreno sobre el túnel.

Los parámetros calculados sirven para estimar la convergencia ε (%) generada en el túnel, como porcentaje del diámetro total del mismo, mediante la Eq. 12:

$$(Eq. 12) \varepsilon = 0.2 \left(\frac{\sigma_c}{p_o} \right)^{-2}$$

El porcentaje de la convergencia es el parámetro empleado para valorar el grado de Squeezing (Tabla 11). Este criterio permite la valoración del fenómeno en la fase de estudio, previa a la excavación del túnel y durante la ejecución de este, ya que en ambos casos simplemente se necesita el parámetro de porcentaje de la convergencia (Figura 2).

Para el caso de estudio se ha tomado como referencia la unidad litológica de tobas ácidas, cuyos valores adoptados para el cálculo y para la obtención del squeezing, se indican en la Tabla 12.

3.3.2. Cálculo del Rockburst

El Rockburst, es un fenómeno geomecánico que viene siendo observado en la minería desde el siglo XVIII, no ha sido hasta los años sesenta cuando se ha comenzado a comprender su naturaleza.

Este tipo de comportamiento del macizo rocoso puede definirse como una violenta y súbita fracturación del macizo rocoso (estallido), cuando el macizo acumula un exceso de energía deformacional elástica en la posrotura.

El fenómeno del rockburst, o estallido de roca, provoca accidentes cada año, en minas y túneles profundos.

Como resultado final de la deformación violenta, se manifiesta un fenómeno de lajado o spalling de la roca, de varios decímetros de espesor, o una expulsión de bloques, en función del cual haya sido el mecanismo de inicio del fenómeno y la intensidad del mismo.

Según el mecanismo que desencadena la aparición del fenómeno, podemos clasificarlo en dos tipologías generales (Kaiser, 1999):

- Sísmicamente inducido: consiste en la proyección de bloques existentes, por efecto de algún evento sísmico remoto.
- Tensional (Strainburst, Ts): se origina por acumulación de energía deformacional en zonas con elevado nivel de tensión. El mecanismo es autoiniciado, ya que el fenómeno lo desencadena el reajuste tensional producido tras la excavación, generando en la roca el citado efecto de lajado. Este mecanismo es el más habitual y el que normalmente cita la literatura técnica.

Por tanto, es preciso determinar el strainburst, ya que se trata del mecanismo principal y predominante.

Para que un macizo rocoso pueda presentar este comportamiento (strainburst), deben concurrir simultáneamente las siguientes circunstancias:

- Que la roca sea capaz de acumular suficiente energía deformacional, lo cual generalmente implica que el macizo posea determinadas propiedades mecánicas.
- Que el nivel tensional sea elevado.
- Que el macizo rocoso no se encuentre muy fracturado, ya que la fracturación disipa las tensiones y reduce la acumulación de energía.

Para el caso del estudio, se determinó este fenómeno, mediante el criterio de la Tensión Tangencial (Wang Y & LI W, 1988), el cual, considera tanto el estado tensional del macizo rocoso, como las propiedades mecánicas de las rocas y constituye una evolución del criterio de Hoek, E., & Carranza -Torres, C. y. (2000).

El valor de Ts se obtiene de la expresión (Eq. 13):

$$(Eq. 13) T_S = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_c}$$

Donde:

σ_θ = Tensión tangencial de la roca ubicada en la periferia de la excavación.

σ_c = Resistencia a compresión uniaxial de la roca del macizo rocoso.

Para obtener el valor de σ_θ , puede considerarse que es la tensión provocada por el peso de la columna litostática suprayacente (tensión in situ), entonces $\sigma_\theta = p_o$.

Según el autor, el riesgo de estallido de roca se cuantifica en base al parámetro Ts de acuerdo con la Tabla 13.

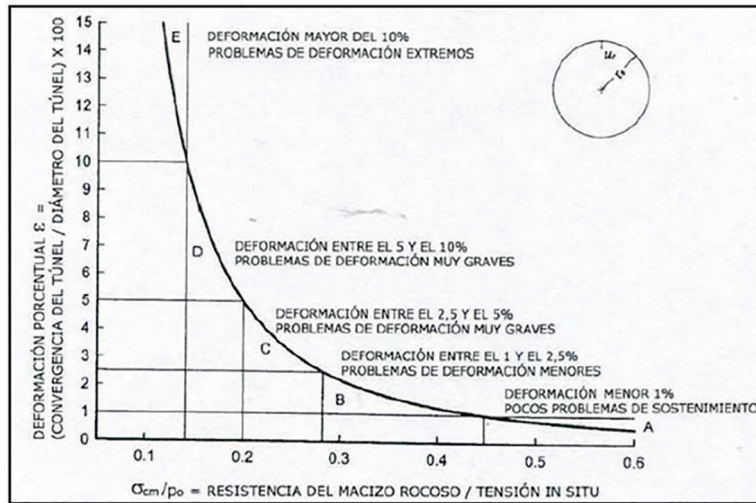


Figura 2. Clasificación squeezing

Fuente: (Marinos & Hoek, Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, 2001)

Tabla 11. Grados de squeezing (Marinos & Hoek, Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, 2001)

Clase	Convergencia (%)	Grado de squeezing
A	< 1%	No se desarrolla squeezing.
B	1%-2,5%	Squeezing ligero: problemas de soporte resolubles con gunita, arcos metálicos ligeros y pernos.
C	2,5%-5%	Squeezing moderado: problemas resolubles con hormigón proyectado y cerchas pesadas.
D	5%-10%	Squeezing severo: soporte muy pesado problemas de estabilidad del frente, enfilajes y paraguas.
E	> 10%	Squeezing extremo: soportes especiales, graves problemas de estabilidad del frente.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Valores de squeezing obtenidos para el macizo rocoso de tobas ácidas

Clase	Cobertura Z m	Tobas ácidas					Squeezing ε %	Clase
		Macizo rocoso		Tensión in situ				
		Peso específico MN/m³	σc MPa	po MPa				
III	100	0.0237	2.7	2.37	0.15	A		
IV	100	0.0213	0.9	2.133	1.24	B		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Valoración del riesgo de estallido sobre la base del criterio de la tensión tangencial

Ts	Valoración del riesgo de estallido
< 0,3	No existe riesgo
0,3-0,5	Riesgo de débil estallido
0,5-0,7	Riesgo de estallido fuerte
> 0,7	Riesgo de estallido violento

Fuente: Elaboración propia

Para el presente estudio, los cálculos obtenidos se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de rockburst obtenidos para el macizo rocoso de tobas ácidas

Clase	Tobas ácidas					
	Cobertura	Macizo rocoso		Tensión in situ		Rockburst
	Z m	Peso específico MN/m³	σc MPa	po MPa	Ts	Valoración
III	50	0.0237	2.7	1.185	0.44	Riesgo de débil estallido
IV	50	0.0213	0.9	1.0665	1.24	Riesgo de estallido violento

Fuente: Elaboración propia

3.4 Propuesta y resumen de sostenimiento

La valoración de la calidad geotécnica del macizo rocoso, empleando el índice Q (Barton, 1974), permitió definir (empíricamente), el tipo de sostenimiento que se puede aplicar al macizo rocoso en las excavaciones subterráneas para calidad geotécnica buena, mediana y mala. La propuesta del sostenimiento a aplicarse, se indica en la Tabla 15. Para identificar el tipo de categoría propuesto, ver Figura 3.

3.5 Modelo geotécnico propuesto

En base a los levantamientos en subterráneo y el análisis de información preexistente, en la Figura 4, se presenta el modelo geotécnico propuesto (Zonificación Geotécnica) para la concesión Asonambile.

La roca de Clase V (calidad muy mala), corresponde a la capa más superficial del terreno, que presenta bajas calidades geotécnicas debido al comportamiento mecánico

Tabla 15. Propuesta del sostenimiento a emplearse, en las excavaciones subterráneas de Asonambile

Estimación empírica del tipo de sostenimiento, en base al índice Q (Barton, 2000)				
Clase	Calidad	Categoría	Longitud del perno de anclaje	Separación de los pernos de anclaje
li	Buena	1 o 2	< 3.0 m	1.5 m x 1.5 m
lii	Media	3	< 3.0 m	2.0 m x 2.0 m
liv	Mala	5	< 3.0 m	1.5 m x 1.5 m

Fuente: Elaboración propia

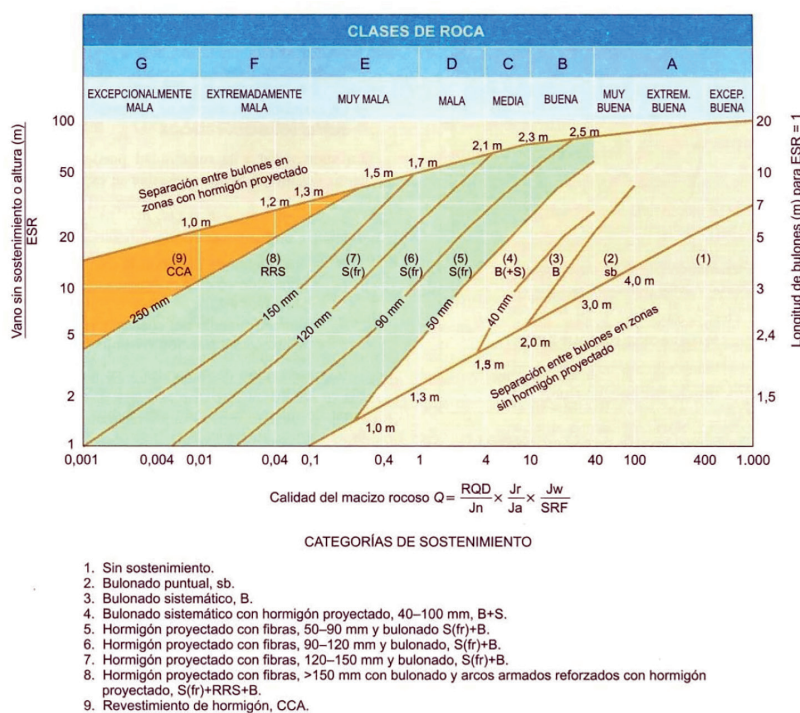


Figura 3. Sostenimiento en base a la Clasificación Q

Fuente: (González de Vallejo L., 2002)

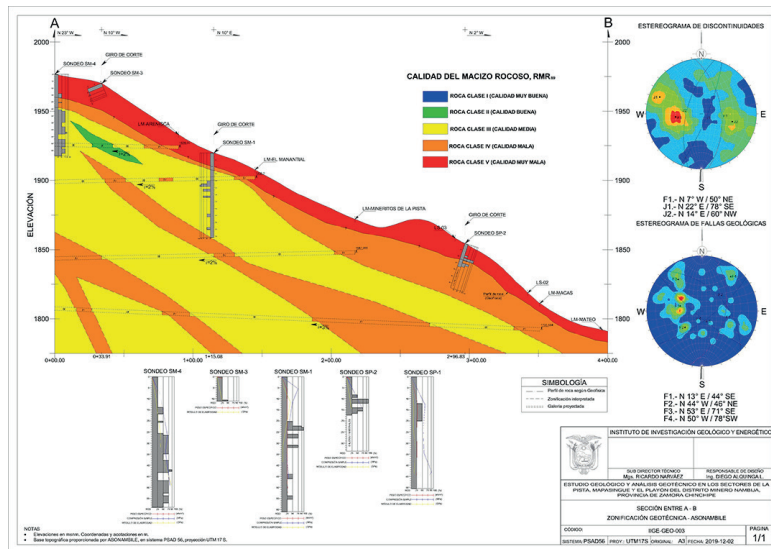


Figura 4. Modelo geotécnico propuesto (zonificación geotécnica).
Fuente: Elaboración propia

del terreno afectado por procesos de intemperismo y erosión. Por lo general, en las labores mineras visitadas, el macizo rocoso con esta calidad se localizaba con un sostenimiento reforzado.

La roca de Clase IV (calidad mala), por lo general se presenta asociada con zonas de macizo rocoso afectados por fallas geológicas, cuya tendencia principal, de acuerdo con el Estereograma de Fallas Geológicas, es N 13° E con inclinación de 44° en dirección al SE. Las zonas de macizo rocoso que presentan esta calidad geotécnica deben ser sometidas a un tipo de sostenimiento especial, empleando elementos estructurales como concreto, cerchas metálicas, entre otras.

La roca de Clase III (calidad media), es la más característica en la zona de estudio. Por lo general, se presenta entre dos zonas de macizo rocoso de Clase IV.

También se ubicaron (en menor cantidad), zonas con macizo rocoso de Clase II (calidad buena), misma que aflora a manera de cuñas, inmersa en rocas de Clase III.

IV. DISCUSIÓN

En la evaluación geomecánica global del macizo rocoso, se empleó el Rock Mass Rating, RMR (Bieniawski, 1989) y el índice Q de calidad para túneles (Barton, 1974), de los cuales, mediante relaciones empíricas se calculó el Geological Strength Index, GSI (Marinos & Hok, P, 2001), se valoró la calidad del macizo rocoso en las labores mineras inspeccionadas y se estimaron los parámetros de resistencia, definiendo medidas de sostenimiento en base al índice Q.

El cálculo de los parámetros geomecánicos de las discontinuidades y del macizo rocoso, se obtuvieron a partir de los criterios de (Barton & Cloubey, 1977) y Hoek, E., & Carranza-Torrez, C. y. (2002), respectivamente, en conjunto

con el software RocData 3.013, de la casa RocScience; obteniendo los valores cuantitativos referenciales de las propiedades geomecánicas para el análisis de la estabilidad del macizo rocoso, con la aplicación de los métodos tensos deformacionales.

(Selmer & Broch, 1978), indican que se pueden generar problemas de estabilidad en obras subterráneas, inducidas por esfuerzo generados en el macizo rocoso, obteniendo de esta manera el grado de “squeezing” (Barla, 1995, Marinos & Hoek, 2001) y el “rockburst” (Kaiser, 1999) para macizos rocosos descritos con calidad geotécnica Media (Tipo III) y Mala (Tipo IV), tomando como referencia labores mineras ubicadas a una profundidad de 100 m desde la superficie, determinando que en estas labores, se pueden generar estallidos violentos, que provocan excavaciones inestables, por lo cual, es imprescindible la colocación de elementos estructurales de soporte, que brinden seguridad física, tanto para el personal como para la maquinaria.

V. CONCLUSIONES

- Para la evaluación de la calidad geotécnica del macizo rocoso en subterráneo, de las labores mineras, se ejecutó en base al índice RMR (Rock Mass Rating) descrito por Bieniawski (1989) y el índice Q, definido por Barton (1974). Adicionalmente, se calculó el índice GSI (Geological Strength Index), definido por (Marinos & Hoek, P, 2001).
- Se ejecutó el levantamiento de la calidad geotécnica del macizo rocoso, a lo largo de 2473 metros lineales de galerías subterráneas en el área de Asonamble.
- Los valores de los parámetros mecánicos del macizo rocoso y de las discontinuidades, se

obtuvieron en base a los criterios de Hoek et.al. (2002) y Barton –Choubey (1977).

- La estabilidad del macizo rocoso en las labores subterráneas debe ser solventada mediante la aplicación de elementos estructurales de sostenimiento, empleando hormigón proyectado (con o sin fibras de acero), malla electrosoldada y pernos de anclaje pasivos y activos (de ser el caso), especialmente en zonas con calidad geotécnica mala y muy mala.
- Las propiedades mecánicas del macizo rocoso, indican que las labores mineras ubicadas desde los 100 metros de profundidad (desde la superficie), puede generar estallidos violentos en el macizo rocoso, que provocan excavaciones inestables.
- Las propiedades mecánicas del macizo rocoso, indican que para labores mineras ubicadas hasta los 50 metros de profundidad (desde la superficie), presenta un riesgo mínimo de estallido del macizo rocoso.
- El presente estudio propone además un sistema de sostenimiento (empírico), para zonas con calidad geotécnica buena, media y mala, que debe ser corroborado con los modelos tenso deformacionales del macizo rocoso.

North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), University of Toronto Press, Toronto, Ont., Canada, 1, 267–273.

- IIGE. (2019). *Estudio geológico y análisis geotécnico en los sectores de La Pista, Mapasingue y El Playón, del distrito minero Nambija, provincia de Zamora Chinchipe . Quito.*
- INIGEMM. (2013). *Informe técnico final proyecto rehabilitación Nambija.* Artículo inédito-INIGEMM.
- Kaiser, P. (1999). *Lessons learned for deep tunnelling from rockburst in minning .* Suiza: Laurentian University. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775515301840.pdf>
- Marinos, P., & Hoek, E. (2001). *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch.* *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 60(2), 85–92.* <https://doi.org/10.1007/s100640000090>
- Selmer-Olsen, R., & Broch, E. (1978). GENERAL DESIGN PROCEDURE FOR UNDERGROUND OPENINGS IN NORWAY. In *Storage in Excavated Rock Caverns: Rockstore 77* (pp. 219–226). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8406-4.50046-4>
- Wang Y, & LI W. (1988). *Fuzzy estimation method of rockburst prediction.* *Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering* https://www.researchgate.net/publication/274436958_Knowledge-based_and_data_driven_fuzzy_modeling_for_rockburst_prediction

VI. AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al Instituto de Investigación Geológico y Energético del Ecuador, que en esta ocasión nos permite presentar este artículo. También nuestra gratitud a todos los colaboradores que intervinieron directamente en la fase de campo y en este documento refleja su profesionalismo y elevado conocimiento técnico.

VII. REFERENCIAS

- Barla, G. (1995). Squeezing rocks in tunnels. *ISRM News Journal, 3-4.*
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice.* *Rock Mechanics and Rock Engineering, 10, 1-54.* <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.* *Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique Des Roches, 6, 189–236.* <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications.* A Wiley Interscience Publication. <https://pdfcoffee.com/engineering-rock-mass-classifications-z-t-bieniawskipdf-4-pdf-free.html>
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica.* Madrid: PEARSON EDUCACIÓN. https://www.academia.edu/50773034/INGENIERIA_GEOLOGICA_GONZALES_DE_VALLEJO.pdf
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B.: Hoek-Brown failure criterion (2002) *Edition, Proceedings of the 5th*

Contribución de autoría

Conceptualización, Análisis formal, Redacción - borrador original: Fernanda Andrade Mantilla.

Curación de datos, Metodología y Software: Diego Alquinga López.

Supervisión, Investigación, Validación, Visualización, Redacción - revisión y edición: Fernanda Andrade Mantilla y Diego Alquinga López.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.