

Evaluación Geomecánica de la Estabilidad de las Cavernas Humanti, Archidona-Napo

Geomechanical Evaluation of the Stability of the Humanti caverns, Archidona-Napo

Slendy Yépez¹, Anderson Ocampos¹, Jorge Espín¹, Edgar Chulde²

¹ Grupo de Investigación en Geofísica y Geotecnia, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Tena-Ecuador. E-mail: lolitayc1213@gmail.com, geoderasesoria@gmail.com, jorge.espin@ikiam.edu.ec

² Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, Tena-Ecuador. E-mail: edgar.chulde@gestionderiesgos.gob.ec

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 26-05-2022
Fecha de aceptación: 05-09-2022

RESUMEN

La estabilidad de las cavernas Humanti, provincia de Napo, Ecuador, fue evaluada mediante las clasificaciones geomecánicas: RMR de Bieniawski, índice Q de Barton, y con técnicas de análisis cinemático. Las clasificaciones geomecánicas determinan la calidad del macizo rocoso mediante la asignación de una puntuación, para conocer su estabilidad global y generar recomendaciones de sostenimiento. Los resultados de cuatro estaciones geomecánicas mostraron que las cavernas presentan una calidad de roca regular, y están alejadas de la inestabilidad a nivel sección. Por otra parte, el análisis cinemático permitió determinar los modos de fallo que son controlados por la estructura del macizo rocoso, mediante esta técnica se identificó un total de quince cuñas inestables en el techo.

Palabras clave

Análisis cinemático, cuevas kársticas amazónicas, Índice Q, RMR de Bieniawski.

ABSTRACT

The stability of the Humanti caverns, Napo province, Ecuador, was evaluated by means of geomechanical classifications: Bieniawski's RMR and Barton's Q index, as well as kinematic analysis techniques. The geomechanical classifications determine the quality of the rock mass by assigning a score to determine its overall stability and generate support recommendations. The geomechanical station results show that the caverns are stable. Rock quality is regular at the four sites studied at section level. On the other hand, the kinematic analysis allowed determining the failure modes that are controlled by the structure of the rock mass, through this technique a total of fifteen unstable wedges in the roof were identified.

Keywords

Kinematic analysis, amazon karst caves, Q index, RMR of Bieniawski.

1. INTRODUCCIÓN

Las cavernas han servido a los seres humanos desde la antigüedad, primero como refugio y actualmente como un atractivo turístico debido a las grandes morfologías que alberga [1]. En la Amazonía ecuatoriana se encuentran las cavernas de Humanti de la provincia de Napo, las cuales son uno de los atractivos turísticos más conocidos a nivel nacional e internacional. Estas cavidades naturales se formaron en los terrenos kársticos de la formación Napo, compuesta principalmente por rocas carbonáticas que junto con los caudales acidificados se complementan para formar cavernas [2].

La mayoría de cavernas a nivel mundial se desarrollan en macizos rocosos calizos que se caracterizan por su estabilidad, sin embargo, en algunos casos podrían presentar distintos tipos de colapsos [3]. De hecho, cavernas de pequeñas dimensiones pueden sufrir derrumbes en zonas que presentan masas de roca con altos grados de fracturación y/o baja coherencia [1].

En excavaciones subterráneas los colapsos más comunes son los que involucran cuñas que caen desde el techo o se deslizan por las paredes laterales. Estas geometrías se originan debido a la intersección de elementos estructurales, como juntas y planos de estratificación, las cuales producen la separación de la masa rocosa [4]. En el caso de cavernas en rocas carbonatadas también pueden presentarse peligros geológicos como: hundimiento, caídas de roca, deslizamientos y colapsos del techo, los cuales son problemas comunes en los países tropicales debido al acelerado proceso de disolución [5].

El estudio del karst es importante desde el punto de vista geológico y geotécnico, debido a que pueden presentar problemas de inestabilidad y generar pérdidas económicas, materiales e incluso vidas humanas [6]. El objetivo de este estudio fue analizar la estabilidad de las cavernas Humanti mediante dos enfoques, el

primero relacionado a la estabilidad global, y el segundo orientado a determinar la posible caída de bloques debido al arreglo estructural de las discontinuidades en el techo de las cavernas.

1.1 Área de estudio

Las cavernas Humanti se desarrollan en la Formación Napo (Fig. 1), la cual contiene grandes karst y una edad Albiano-Campaniano Temprano dentro de la cuenca amazónica ecuatoriana. Esta formación geológica tiene una edad aproximada de 100 millones de años [7], y presenta cuatro secuencias (Napo Basal, Inferior, Medio y Superior), todas de origen marino de aguas poco profundas. Litológicamente, esta formación se constituye de una serie de calizas fosilíferas, intercaladas con areniscas calcáreas y lodolitas negras. Estas calizas se distribuyen en su gran mayoría al este de las ciudades de Tena y Archidona, y es precisamente en esta extensión territorial donde se encuentran gran parte de estructuras kársticas [2].

Las Cavernas Humanti son conocidas también como cavernas Jumandy y se localizan en la provincia de Napo, cantón Archidona, aproximadamente a 180 km de Quito. Es la principal caverna visitada por los turistas. Durante el año 2016 la visitaron un total de 28184 turistas [8], siendo un factor importante para la actividad económica del sector. Además de ser un atractivo turístico, este lugar ha sido de gran relevancia para estudios científicos dentro de las áreas de geología, espeleología e hidrogeología [2].

Cerca de la zona de estudio se registra la existencia de dos fallas geológicas denominadas Río Jondachi y la Merced de Jondachi, pertenecientes al tipo de fallas inversa ciega y transcurrente inversa, respectivamente [9, 10].

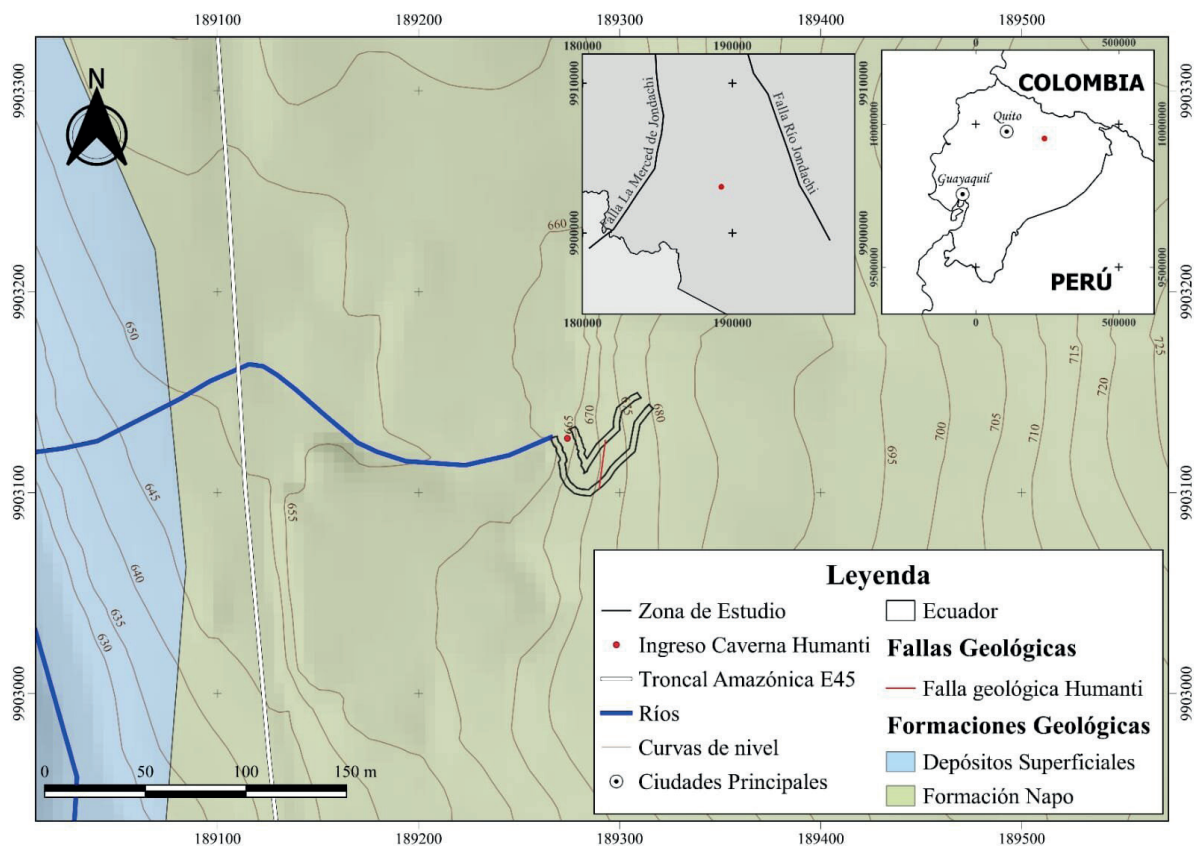


Figura 1. Mapa geológico y de ubicación de las cavernas Humanti, donde se muestra el trayecto estudiado.

2. MÉTODOS

Se analizó la estabilidad de las cavernas en los primeros 70 m desde la entrada principal, mediante la recolección de información *in situ* de 4 estaciones geomecánicas y su posterior procesamiento.

2.1 Clasificaciones geomecánicas

La estabilidad global fue analizada aplicando las clasificaciones geomecánicas Rock Mass Rating (RMR) e índice Q, las cuales son métodos ampliamente aceptados de manera internacional por profesionales en mecánica de rocas facilitando la caracterización, clasificación y conocimiento de las propiedades de los macizos rocosos [11]. Estas clasificaciones fueron originalmente creadas para la ejecución de excavaciones subterráneas, y se han usado desde 1970 [12, 13] hasta la actualidad. Es fundamental indicar que las clasificaciones geomecánicas mencionadas también son aplicables a cavernas o espacios subterráneos formados naturalmente, como se reporta en literatura [1, 4, 14, 15, 16]. Incluso el índice Q ha sido ampliamente usado en cuevas kársticas y volcánicas [17, 18].

La clasificación RMR [12] permite estimar la calidad del macizo rocoso teniendo en cuenta 6 parámetros:

- La resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- El grado de fracturación en término del RQD.
- El espaciado de las discontinuidades.
- Las condiciones de las discontinuidades (persistencia, abertura, relleno, rugosidad y alteración).
- Condiciones hidrogeológicas.
- La orientación de las discontinuidades con respecto a la estructura de la caverna.

Los resultados del RMR varían en un rango de 0 a 100 puntos, dividiendo la calidad del macizo rocoso en 5 clases, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Calidad del macizo de acuerdo al resultado del RMR.

Clase	Calidad	RMR
I	Muy buena	100 - 81
II	Buena	80 - 61
III	Media	60 - 41
IV	Mala	40 - 21
V	Muy mala	<20

El índice Q, asigna una puntuación de acuerdo a la calidad del macizo rocoso que aumenta a medida que mejora la calidad de la roca. La variación de esta clasificación geomecánica no es lineal como el RMR sino exponencial, y oscila entre $Q = 0,001$ para una roca excepcionalmente mala, hasta $Q = 1000$ para una roca excepcionalmente buena [13]. El valor Q, se obtiene a partir de 6 parámetros de acuerdo a la siguiente expresión:

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

Donde el primer cociente corresponde a una estimación del tamaño de los bloques que conforman la matriz rocosa, el segundo a una estimación de la resistencia al corte entre bloques, y el tercero representa lo que Barton et al. [13] denominan esfuerzo “activo”. Se remite al lector a Barton et al. [13, 19, 20, 21] para más detalles sobre el índice Q y las tablas de aplicación de los parámetros mencionados.

Con el fin de evaluar la estabilidad de la sección es necesario tener la calidad del macizo en términos del índice Q, así como medidas del ancho de la sección a lo largo de la longitud estudiada [6, 17]. Por esta razón, se calculó un valor de Q a partir del RMRb aplicando la ecuación (2) [12], al cual se le denominó Q_r . La importancia de las clasificaciones geomecánicas RMR y Q, no simplemente radica en conocer la calidad del macizo rocoso, sino también, brindan soluciones sobre medidas de sostenimiento.

$$Q_r = e^{\left(\frac{RMRb-44}{9}\right)} \quad (2)$$

2.2 Estabilidad estructuralmente controlada

El análisis de estabilidad estructuralmente controlada se realizó mediante análisis cinemático, el cual permite determinar los modelos de rotura resultantes de la combinación de discontinuidades identificadas en el macizo rocoso [11].

Generalmente en excavación de túneles diaclasados, los tipos de fallos más comunes, son cuñas que caen del techo o se deslizan por las paredes laterales [4]. En nuestro caso, las cavernas presentaron similares condiciones debido a que el macizo posee escasos metros de cobertera y se encuentra afectado por varias familias de juntas. La identificación y estabilidad de las posibles cuñas se realizó mediante el programa UNWEDGE v.3.0, basado en el método de equilibrio límite, el cual analiza las fuerzas que

actúan a lo largo de un plano potencial de fallo, teniendo como fin determinar un factor de seguridad (FS).

El criterio de rotura Barton y Choubey ecuación (3) [22] permite determinar la resistencia al corte de las discontinuidades rugosas:

$$\tau = \sigma_n [\Phi_r + JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)] \quad (3)$$

- τ : resistencia máxima al corte;
- σ_n : esfuerzo normal efectivo;
- JRC : coeficiente de rugosidad de la discontinuidad;
- JCS : resistencia a la compresión de la pared de la junta;
- Φ_r : ángulo de fricción residual.

Con el objetivo de tomar en cuenta el efecto escala de las discontinuidades se utilizó la ecuación (4) [23]:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 * JRC_0} \quad (4)$$

- JRC_0 : Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (se tomó un valor de 9 a partir del rugosímetro);
- L_n : longitud de la discontinuidad;
- L_0 : longitud del rugosímetro empleado.

3. RESULTADOS

Los parámetros geomecánicos (por estación para determinar la calidad del macizo rocoso obtenidos a partir de la clasificación de macizos rocosos RMR [12] e índice Q [12] [13] se muestran en la Tabla 2 y 3, respectivamente. En total se realizaron cuatro estaciones geomecánicas denominadas EG1, EG2, EG3 y EG4. El número de estaciones geomecánicas establecidas estuvo en función de la observación realizada *in situ* de las cavernas, tomando como criterio la apariencia estructural de las capas, y no la litología, debido a que esta no presentaba variaciones. En vista de aquello, cada una de las estaciones geomecánicas mencionadas se levantaron a 5m, 26m, 58m y 65m, respectivamente. Los tramos que representan cada estación geomecánica se visualizan en la Tabla 4.

Es importante mencionar que se realizó un perfil geológico (Fig. 2) con el fin de tomar en cuenta el espesor de la cobertera para el cálculo del factor de reducción de esfuerzos (SRF), así como para el análisis cinemático.

La Tabla 3, muestra los resultados del índice Q y Qr, y tomando en cuenta el ancho de la caverna, los resultados de estabilidad global se presentan en las Fig. 3 [6] y Fig. 4 [17].

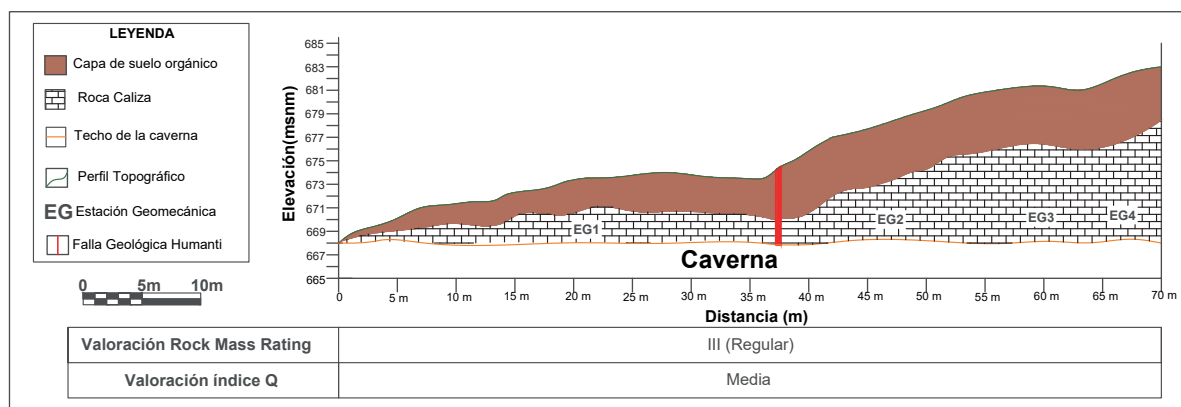


Figura 2. Perfil topográfico y geotécnico de las cavernas Humanti.

Tabla 2: Puntaje de los parámetros geotécnicos para el cálculo de RMR de las estaciones geomecánicas (EG).

EG	Tipo de Plano	Orientación (°)	UCS	RQD	Espaciamiento	Persistencia	Aber-tura	Rugosi-dad	Relle-no	Alteración	Agua Subter-ránea	RMRb	RMR
1	S0	245/10	3	16	6	0	0	5	6	5	4	47	35
	J1	327/45	3	16	12	6	0	5	0	5	10		
	J2	45/76	3	16	8	0	0	5	0	5	4		
2	S0	245/10	4	16	7	1	0	5	0	3	10	51	41
	J1	263/79	4	16	8	2	0	3	4	5	10		
	J2	355/90	4	16	7	6	0	3	4	5	10		
3	S0	38/10	2	18	8	4	0	5	2	5	15	58	46
	J1	184/90	2	18	10	4	1	5	4	5	10		
	J2	310/70	2	18	8	6	0	5	4	5	10		
	J3	60/59	2	18	9	6	1	5	1	5	10		
4	S0	315/20	2	16	8	2	0	5	0	5	10	56	44
	J1	145/90	2	16	7	6	1	3	6	5	10		
	J2	75/70	2	16	14	4	1	3	1	5	15		
	J3	116/70	2	16	7	6	1	3	1	5	15		
	J4	225/52	2	16	7	6	1	5	1	5	15		
	J5	355/62	2	16	6	6	1	3	1	5	15		

Tabla 3: Valores de los parámetros geotécnicos para el cálculo del índice Q.

EG	Tipo de Plano	Orientación (°)	RQD %	Puntuaciones					Índice Q	Índice Q a partir del RMRb (Qr)
				Jn	Jr	Ja	Jw	SRF		
1	S0	245/10	82	9	2	4	1	1	5	1
	J1	327/45								
	J2	45/76								
2	S0	245/10	82	9	2	3	1	1	6	2
	J1	263/79								
	J2	355/90								
3	S0	38/10	92	15	2	3	1	1	4	5
	J1	184/90								
	J2	310/70								
	J3	60/59								
4	S0	315/20	81	15	3	4	1	1	4	4
	J1	145/90								
	J2	75/70								
	J3	116/70								
	J4	225/52								
	J5	355/62								

Tabla 4: Ubicación de las estaciones geomecánicas de las cavernas Humanti.

Estación Geomecánica	Distancia de la EG levantada in situ (m)	Tramo que representa (m)
EG1	5	0-25
EG2	26	25-57
EG3	58	57-65
EG4	65	65-70

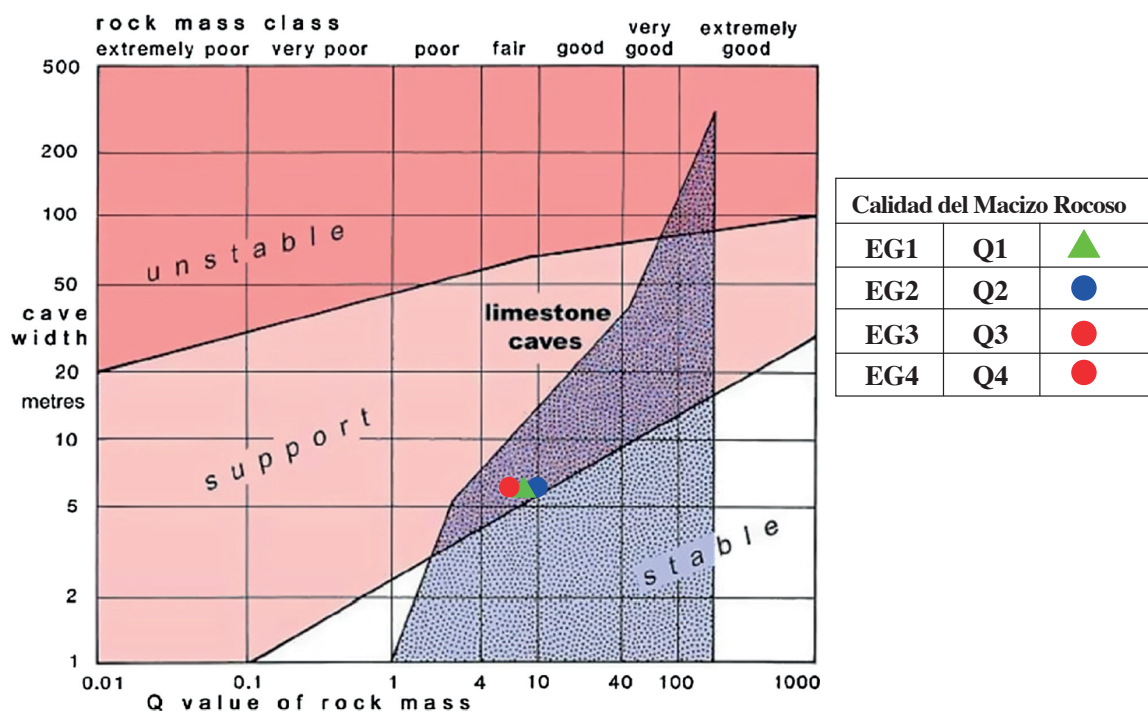


Figura 3: Estabilidad de la caverna en relación con la anchura de la caverna y la calidad del macizo rocoso Fuente: [6]. Los valores Q, fueron obtenidos a partir del índice Q directo.

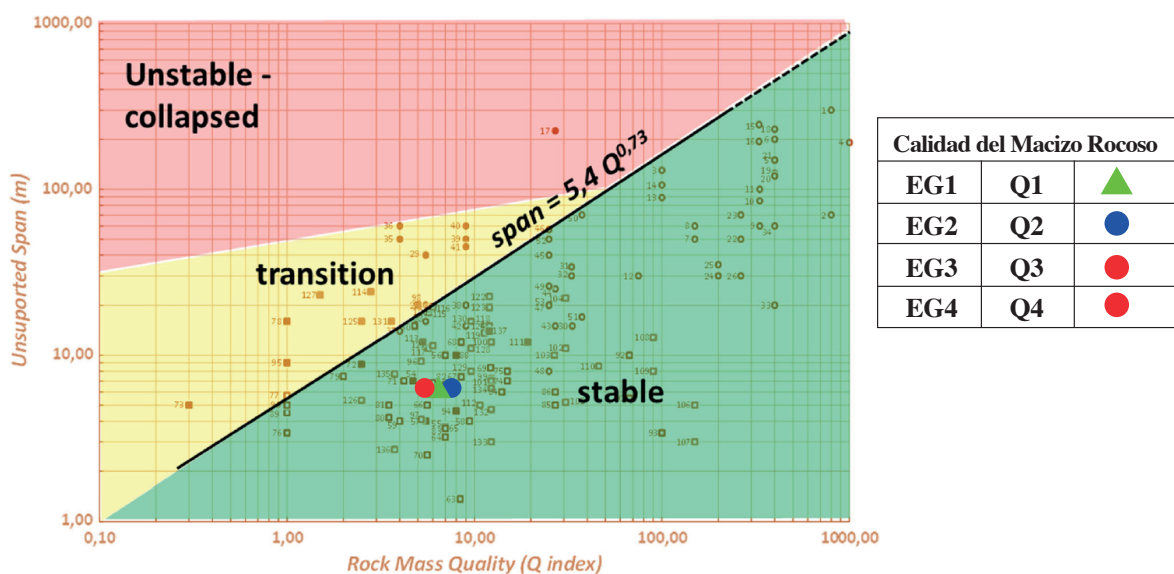


Figura 4: Estabilidad de la caverna en relación con la anchura de la caverna y la calidad del macizo rocoso Fuente: [17]. Los valores Q, fueron obtenidos a partir del índice Q directo.

Con el fin de recomendar medidas de sostenimiento en la caverna Humanti se usó la Fig. 5 [21], la cual muestra las medidas de sostenimiento para cada valor obtenido de acuerdo al índice Q.

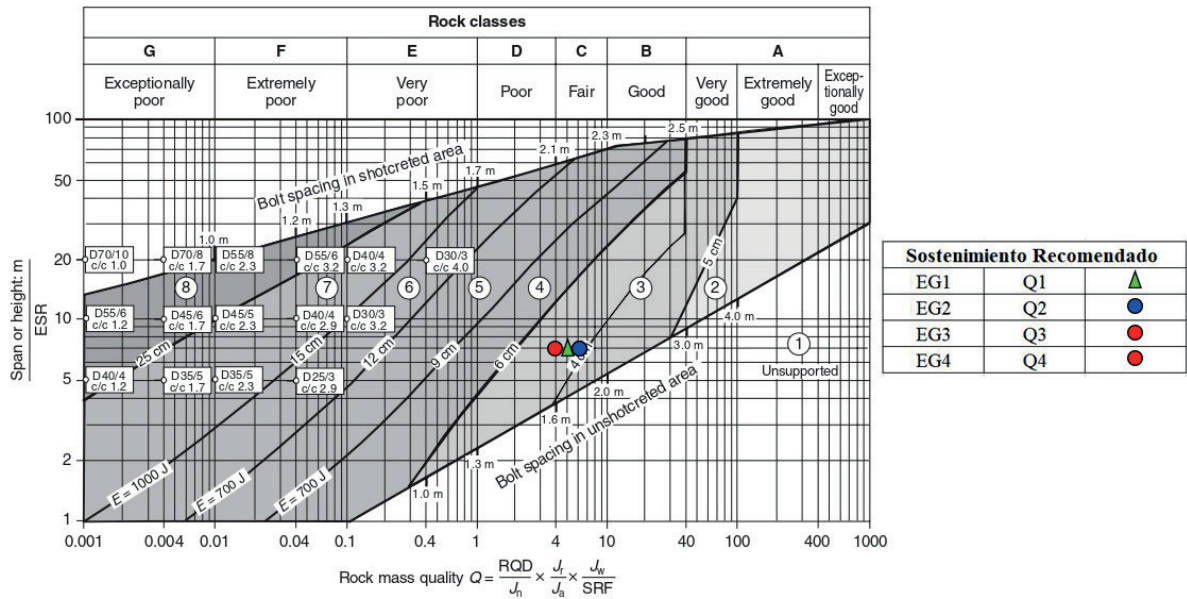


Figura 5: Tipo de sostenimiento según el Índice Q. Fuente: [21].

El mapa estructural del techo de las cavernas que se muestra en la Fig. 6, permite apreciar las orientaciones de los planos. Para la selección de los planos involucrados en el análisis de la estabilidad estructuralmente

controlada se agrupó los planos que se intersecan, en familias (Fig. 7), al final se obtuvieron cuatro tramos. Para la obtención del factor de seguridad se usaron los parámetros de entrada que se muestran en la Tabla 5.

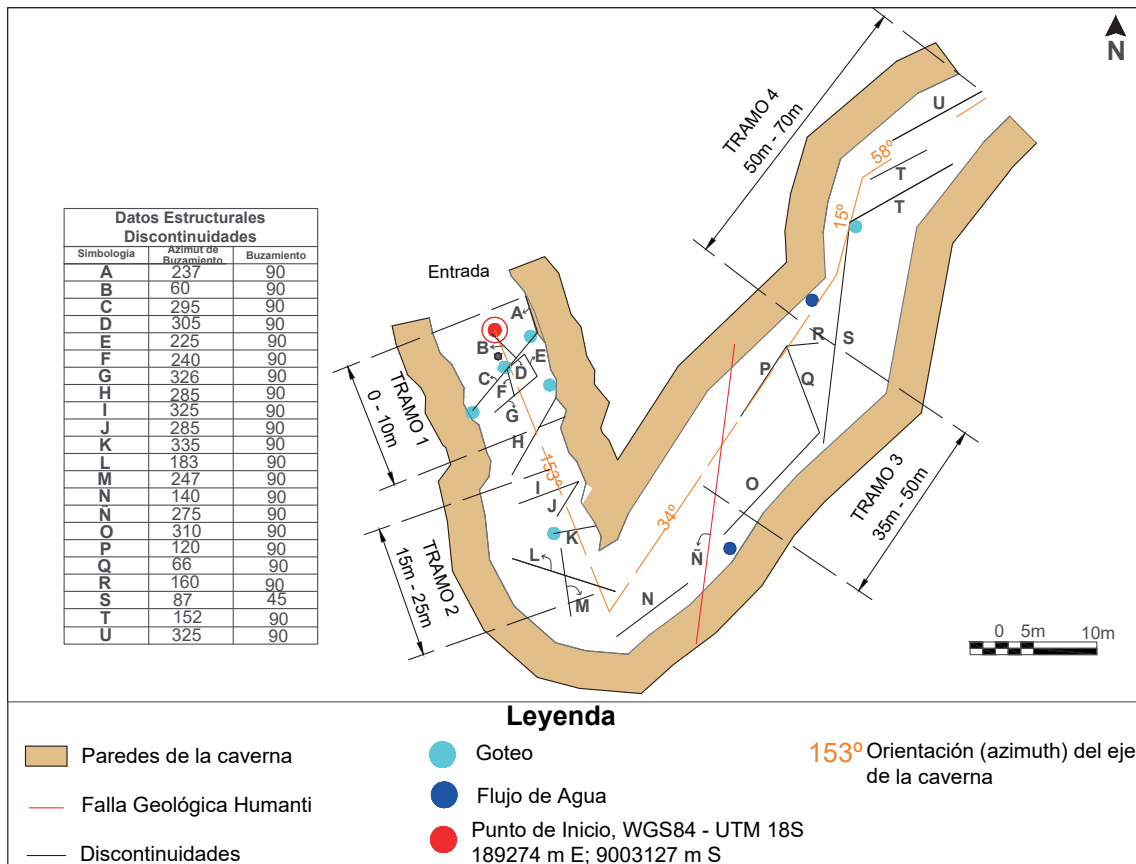


Figura 6: Vista en planta de las discontinuidades del techo de las cavernas Humanti.

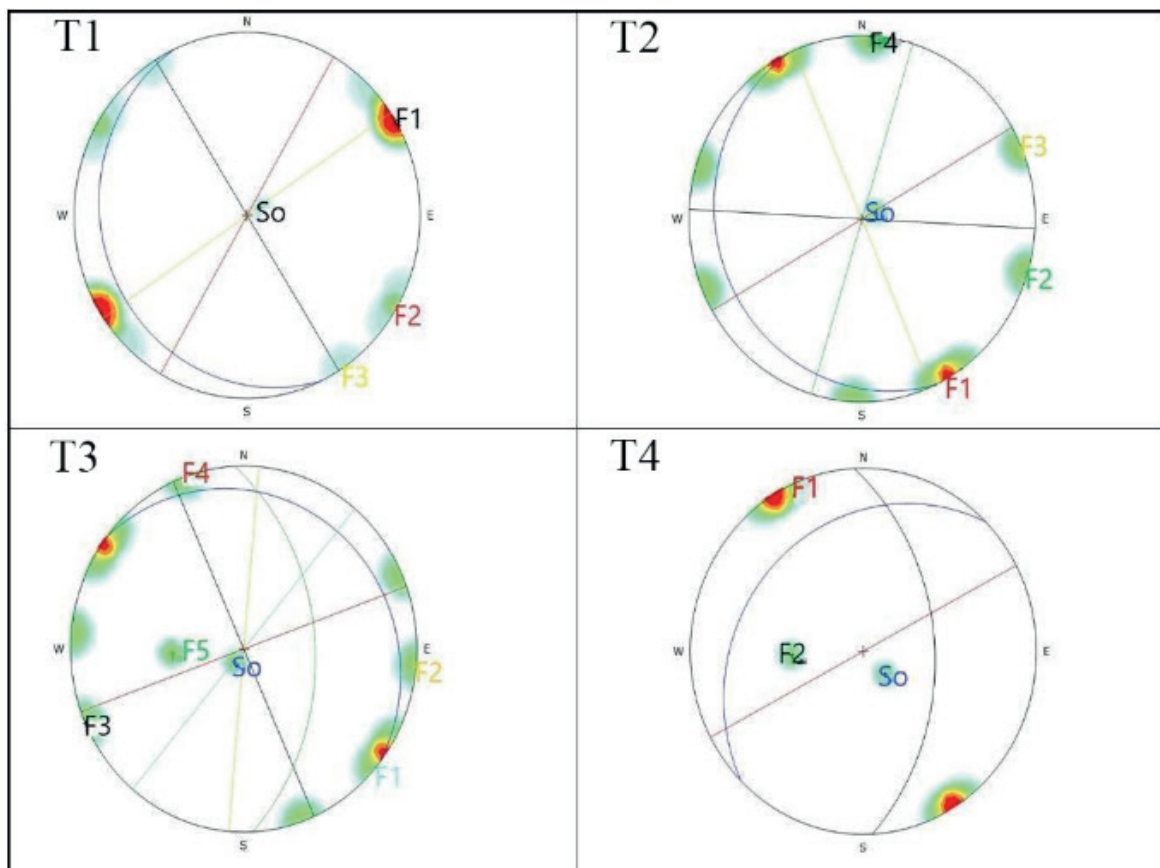


Figura 7: Proyección estereográfica de los cuatro tramos del techo: tramo 1 (T1), tramo 2 (T2), tramo 3 (T3) y tramo 4 T4 de las cavernas Humanti.

Tabla 5: Factor de seguridad de las familias de discontinuidades presentes en el techo y combinación de los planos estructurales que generan rotura en cuñas, en el techo y paredes.

Tramo (m)	Orientación de las discontinuidades	Familia de las discontinuidades	Profundidad	JRCn	Ángulo de fricción	Cohesión (tn/m ²)	Combinaciones que forman cuñas en el techo y paredes	Ubicación	Factor de Seguridad	
0-10	238/90	F1	3	6	40	0.2	F1, F2, So	Techo	0.90	
	300/90	F2		4	36	0.1	F1 F3, So	Techo	1.0	
	326/90	F3		5	38	0.2	F2, F3, So	Techo	0.1	
	245/10	S0		4	36	0.1				
15-25	330/90	F1	6	5	37	0.3	F1, F2, So	Techo	0.4	
	287/90	F2		5	37	0.3	F3, F1, So	Techo	1.8	
	247/90	F3		5	37	0.3	F3, F2, So	Techo	2.1	
	183/90	F4		4	35	0.2	F4, F1, So	Techo	0.2	
	245/10	S0		4	35	0.2	F4, F2, So	Techo	0.2	
						F4, F3, So	Techo	1.9		
35-50	310/90	F1	9.5	4	34	0.4	F1, F3, So	Techo	0.2	
	275/90	F2		4	34	0.4	F1, F4, So	Techo	0.9	
	66/90	F3		4	34	0.4	F1, F5, F4	Techo	0.9	
	160/90	F4		5	36	0.5	F1, F5, So	Techo	1.1	
								F1, F5, So	Pared derecha	2.1
	87/45	F5		4	34	0.4	F2, F1, F5	Techo	1.8	
	38/10	S0		4	34	0.4	F2, F1, So	Techo	0.7	
								F2, F3, F5	Techo	1.3
								F2, F3, So	Techo	0.6
								F2, F4, So	Techo	0.4
F2, F5, So			Techo					Estable		
F3, F1, F5			Techo					0.2		
F3, F4, So	Techo	0.3								
					F4, F5, F3	Techo	0.4			
					F4, F5, So	Techo	1.7			
					F4, F5, So	Pared izquierda	1.3			
50-70	328/90	F1	14	4	33	0.5	F1, F2, So	Techo	0.3	
	87/45	F2		4	33	0.5				
	315/20	S0		4	33	0.5				

En la etapa de campo se identificó una falla geológica debido a la presencia de una brecha de falla, filtración de agua y precipitación de carbonatos en las zonas de debilidad. Además, en superficie exactamente sobre la falla geológica en el punto 36-37.5 m se evidencia

un desplazamiento brusco del terreno Fig. 2. Esta falla geológica detectada no se encuentra reportada en ningún tipo de fuente bibliográfica [9] [10], por lo tanto, se le denominó Humanti.

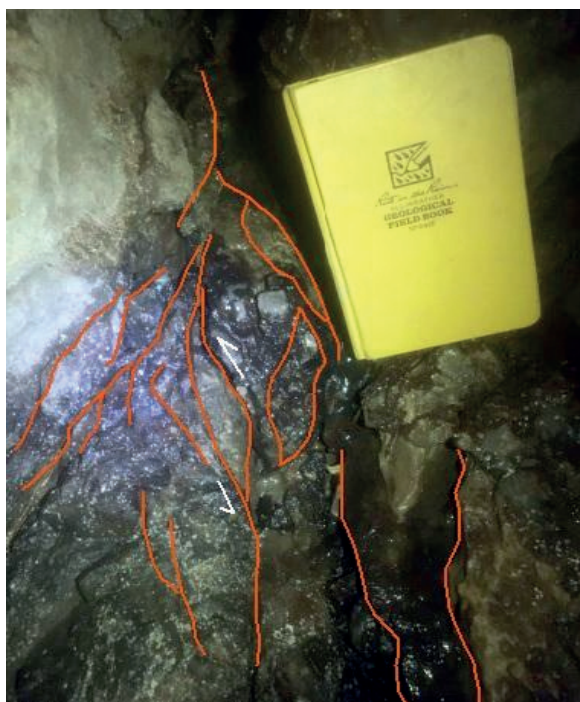


Figura 8. La falla Humanti de orientación 275/90, donde se observa una zona de cizalla S-C, este tipo de estructuras son indicadores de fallas que se producen en rocas sometidas a esfuerzos que exceden su resistencia mecánica. En la zona de falla se evidenció el desarrollo de pequeños planos de cizalla separados por unos cuantos centímetros entre sí (8-12 cm) y con un ordenamiento subparalelo [24].

4. DISCUSIÓN

La calidad de la roca en las 4 EG presentó una calificación regular (clase III: 47-58) de acuerdo a la clasificación RMRb [12]. De la misma forma, se determinó una calidad de roca media, con valores comprendidos de entre 4 a 6 (4-10 roca media) a partir del índice Q [13]. Resultados similares se reportan en varios trabajos, por ejemplo, Whatman y Fookes [6] determinaron que la calidad de un karst calcáreo típico presenta una calidad de roca regular, con un $RMR= 40-60$ [25] y $Q = 4-10$ en el esquema de Barton [13]. Así como también, el trabajo de Goh et al., [5] determinó en rocas calizas un $RMR= 54-66$ y $Q= 1.85-11.66$, en las cuevas de Batu, Malasia.

En el caso de la calidad de roca evaluada con el índice Q_r se obtuvo valores de 1-5 (roca mala-regular). Estos resultados fueron menores en comparación con los obtenidos en el índice Q directo (Tabla 3), en la EG1 se obtuvo un $Q= 5$ y $Q_r= 1$; para la EG2, $Q= 6$ y $Q_r=2$. Sin embargo, en las dos últimas estaciones (EG3 y EG4) los valores se mantuvieron similares, en la EG3, $Q= 4$ y $Q_r= 5$ y para la EG4, $Q= 4$ y $Q_r= 4$. La ecuación aplicada para obtener el

índice Q_r , fue con el fin de comparar los valores con el Índice Q obtenido directamente. El RMR que se consideró para obtener el valor del índice Q_r fue el RMRb, debido a que el parámetro de corrección por orientaciones que afecta al RMR total, posee mayor relevancia cuando se inicia una excavación y no cuando el espacio subterráneo ya existe.

Los valores de RQD en las cuatro estaciones fueron mayores al 80%, lo cual muestra que se trata de un macizo de calidad buena. Estos resultados se asemejan a los mostrados en la investigación de Jordá [17]. Sin embargo, este parámetro no considera la orientación, relleno, alteración y demás condiciones de las discontinuidades, por lo tanto, no es suficiente para abarcar la gran cantidad de características del macizo rocoso [26].

Al comparar los resultados de los parámetros obtenidos del índice Q con los de Jordá [17], se observa similitud en todos, a excepción del parámetro Ja. Ya que, en el presente estudio el valor de Ja es más alto. Esto se puede asociar a las condiciones climáticas del lugar [5].

Algunos de los parámetros usados para determinar la calidad de roca mediante el índice Q tienen lugar dentro de la clasificación RMR, por ejemplo, el RQD, rugosidad, relleno, meteorización y presencia de agua. Sin embargo, el RMRb usado en el presente estudio toma en cuenta parámetros adicionales como su compresión simple, abertura y persistencia. En cuanto a la resistencia a la compresión simple de las paredes de las cavernas en las cuatro estaciones geomecánicas desde su inicio hasta el final se encuentra en un rango de 10-28 MPa. De acuerdo con la clasificación de rocas según su resistencia a compresión uniaxial propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) por sus siglas en inglés, las estaciones EG1, EG3 y EG4 se clasificaron como bajas (5-25 MPa), mientras que la estación EG2 se clasificó como media (25-50 MPa) [27].

De acuerdo a Aydin [28] los valores bajos se deben a factores como: irregularidades de la superficie, grado de meteorización, humedad y eje del martillo. Las irregularidades de la superficie en las cuatro estaciones mostraron discontinuidades que varían entre “rugosas” y “ligeramente rugosas”. Adicionalmente, Aydin et al., [28] en su trabajo discute la influencia de la meteorización en los valores de rebote. Esto se debe a que genera cambios microestructurales, incluso una mínima alteración reduce el valor de la lectura del rebote. En las cuatro estaciones se

muestra una “ligera alteración”, debido a la presencia de agua y humedad en la caverna. Summer y Nel [29] mencionan que la humedad interna genera una disminución no lineal de los valores de rebote. El clima tropical regional es un factor condicionante de la estabilidad de las cavernas que favorece el proceso de disolución y meteorización lo que provoca el deterioro de las propiedades de los karts [5].

Al comparar la Fig. 3 [6] y Fig. 4 [17], se observa que son coincidentes, al indicar que la caverna se encuentra fuera del área de la inestabilidad o colapso. Sin embargo, es importante destacar que en el trabajo de Jordá [17] el ancho de la mayoría de las cavernas kársticas sobrepasa los 30 m, por lo que la Fig. 4 estaría mejor empleada en cavernas de anchos considerables. En nuestro caso el ancho de la caverna varía entre 7 y 8 m.

El análisis cinemático en el techo determinó que en el primer tramo existen nueve diaclasas, dos de ellas con una longitud de 8m, agrupadas en cuatro familias. En tres planos estructurales (F1, F2, F3) se pueden observar filtraciones de agua. Tres de las combinaciones de estos planos generan cuñas, de las cuales, dos presentan un $FS < 1$. En este primer tramo también existe un pilar de concreto en medio de la sección que aparentemente estaría ayudando a la estabilidad, esto podría ser la causa que ocasionen que no fallen los bloques de rocas ubicados al ingreso de la caverna. En el segundo tramo se registró siete diaclasas, evidenciándose filtraciones de agua en una de estas juntas (Fig. 6). Estas diaclasas se agruparon en cinco conjuntos de familias, seis de las combinaciones de estos planos generan cuñas, y tres presentan un $FS < 1$. En el tercer tramo se registró seis diaclasas y una falla geológica, estas juntas se agruparon en seis familias, cinco de estas (F1, F2, F3, F5 y So) presentan una longitud mayor a 6m, y en dos de estas diaclasas (F2, F5) se evidenció filtración de agua. Las combinaciones entre estos conjuntos de discontinuidades determinaron dieciséis posibles roturas de cuña, de las cuales nueve de estas combinaciones presentan un FS inestable. En el tramo cuatro se halló cinco diaclasas, en una de estas diaclasas (F2) existe un goteo que se ubica en la pared lateral izquierda. La única combinación de estas familias presentó una rotura en cuña en el techo con un $FS < 1$.

Como se observa (Tabla 5), el análisis cinemático ha permitido identificar un total de quince posibles situaciones de inestabilidad, debido a la intersección de planos, que presentan valores bajos de seguridad (0.1-0.9).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La calidad de la roca de manera general en la caverna es regular de acuerdo a las clasificaciones geomecánicas RMR e Índice Q.

De acuerdo a la Fig.3 se aprecia que los resultados de estabilidad global caen en la zona de necesidad de soporte, sin embargo, el límite para alcanzar la zona de estabilidad es muy cercana. Por otro lado, en base a la Fig. 4 se observa que las cuatro estaciones geomecánicas se encuentran en la zona estable. Los resultados mencionados coinciden con las observaciones in situ, en vista de aquello, se puede expresar que la estabilidad global de la caverna se encuentra fuera de la región de inestabilidad o colapso.

La calidad de la roca, Qr1 y Qr2 en la EG1 y EG2 obtenidas mediante la clasificación RMRb, muestran resultados menores, en comparación con los valores del índice Q calculados de manera directa.

El análisis cinemático permitió identificar un total de quince posibles caídas de rocas (cuñas) que se ubican en el techo a: 6 m, 8 m, 17 m, 19 m, 23 m, 34 m, 36 m, 40 m, 41 m, 45 m, 47 m, 49 m, 53 m, 55 m y 58 m (Fig.6 y Tabla 5).

5.2. RECOMENDACIONES

El tipo de sostenimiento recomendado deberá consistir en cerchas, con el fin de evitar la perturbación del macizo rocoso. Las medidas de soporte mencionadas se enfocan en servir de protección a los turistas, más que servir de aporte en la mejora de la estabilidad global. Estas deberán situarse en el tramo 1 y en la zona que atraviesa la falla geológica Humanti (36 m - 37.5 m).

Respecto a los resultados arrojados acerca de la estabilidad estructuralmente controlada, así como, a la presencia de bloques caídos en el ingreso a la caverna. Se recomienda la instalación de dispositivos que permitan monitorear a diario, posibles desplazamientos de las discontinuidades, por ejemplo, medidores de juntas.

Es importante destacar, que al ser las cavernas sitios que no permiten mayor intervención debido al tema ambiental y estético, una alternativa sería que los turistas y visitantes efectúen los recorridos por zonas de paso seguras. En vista de aquello, es factible marcar in situ las cuñas inestables.

La metodología RMR e Índice Q, usadas en el presente estudio fueron creadas para excavaciones subterráneas. Por esta situación, es muy probable que los resultados de la calidad del macizo rocoso puedan estar infravalorados y en su consecuencia las medidas de soporte podrían estar sobredimensionadas al usar las clasificaciones geomecánicas y sus recomendaciones. En este caso, al tratarse de una caverna el espacio subterráneo ya existía, por lo tanto, los resultados deben ser tomados como recomendaciones de los sitios específicos dentro de la caverna que necesitan ser atendidos desde el punto de vista de su estabilidad geotécnica, y no como una traducción y aplicación literal de su significado cuando se aplica a túneles o a excavaciones subterráneas.

Para incrementar el conocimiento acerca del comportamiento geomecánico del macizo rocoso, se recomienda realizar estudios de tomografía sísmica, eléctrica, así como algunas perforaciones que permitan conocer las estructuras, litología y caracterizar geotécnicamente la cobertera. Incluso dentro de la caverna sería de gran utilidad tomar muestras, con el fin de obtener parámetros resistentes de laboratorio.

Se recomienda plantear investigaciones enfocadas en el estudio de la falla Humanti observada en campo, con el fin de conocer su contexto tectónico, estructural local y regional, cinemática e incluso su incidencia en el fracturamiento del macizo rocoso.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[1] L. Jordá-Bordéhore, R. Martín-García, A. M. Alonso-Zarza, R. Jordá-Bordéhore y P. L. Romero-Crespo, “Stability assessment of shallow limestone caves through an empirical approach: application of the stability graph method to the Castañar Cave study site (Spain)”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 75, n.º 4, pp. 1469–1483, enero de 2016.

[2] J. L. SÁNCHEZ-CORTEZ et al., “Perspectivas para el uso y aprovechamiento de cavidades naturales en la provincia del Napo, a partir de procesos educativos, investigativos y turísticos”, En: Toulkeridis, T., Constantin, S., Addison, A. (Eds.). 3er Simposio Internacional de Espeleología en el Ecuador. *Boletín Científico*, pp. 88-103. Tena, Ecuador, 2015.

[3] H. Basahel y H. Mitri, “Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: A case study”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, n.º 6, pp. 993–1009, diciembre de 2017.

[4] E. Hoek, *Practical Rock Engineering*, 1st ed. 2007.

[5] T. L. Goh et al., “Stability Assessment of Limestone Cave: Batu Caves, Selangor, Malaysia”, *Sains Malaysiana*, vol. 47, n.º 1, pp. 59–66, enero de 2018.

[6] A. C. Waltham y P. G. Fookes, “Engineering classification of karst ground conditions”, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 36, n.º 2, pp. 101–118, mayo de 2003.

[7] P. Baby, M. V. Rivadeneira y R. Barragán, *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo*. Lima: IFEA, 2004.

[8] A. A. Tafur Bastidas, “CARACTERIZACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES POR ACTIVIDADES TURÍSTICAS EN CAVERNAS JUMANDY, PROVINCIA DE NAPO”, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, 2019.

[9] C. Costa et al., “Hazardous faults of South America; compilation and overview”, *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 104, p. 102837, diciembre de 2020.

[10] A. Egeuz et al., “Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions”, Escuela Politécnica Nacional, U.S. Geological Survey, Universidad Nacional de San Luis, mayo 2003.

[11] R. Tomás et al., “Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado”, *Revista de Teledetección*, n.º 55, p. 1, junio de 2020.

[12] Z. T. Bieniawski, “Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering,” *Eng. rock mass Classif. a Complet. Man. Eng. Geol. mining, civil, Pet. Eng.*, 1989.

[13] N. Barton, R. Lien, and J. Lunde, “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support,” *Rock Mech. Felsmechanik Mécanique des Roches*, 1974.

[14] R. Bhasin, N. Barton, E. Grimstad y P. Chryssanthakis, “Engineering geological characterization of low strength anisotropic rocks in the Himalayan region for assessment of tunnel support”, *Engineering Geology*, vol. 40, n.º 3-4, pp. 169–193, diciembre de 1995.

[15] M. Sapigni, G. La Barbera y M. Ghirotti, “Engineering geological characterization and comparison of predicted and measured deformations of a cavern in the Italian Alps”, *Engineering Geology*, vol. 69, n.º

1-2, pp. 47–62, abril de 2003.

[16] S. Sulha, A. Rifa'i, M. Simatupang y U. Sarita, "Stability Analysis and Strengthening on Zona Karst of Seropan Cave Walls", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 797, p. 012002, junio de 2020.

[17] L. Jordá-Bordehore, "Stability Assessment of Natural Caves Using Empirical Approaches and Rock Mass Classifications", Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 50, n.º 8, pp. 2143–2154, abril de 2017.

[18] L. Jordá-Bordehore, T. Toulkeridis, P. L. Romero-Crespo, R. Jordá-Bordehore y I. García-Garizabal, "Stability assessment of volcanic lava tubes in the Galápagos using engineering rock mass classifications and an empirical approach", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 89, pp. 55–67, noviembre de 2016.

[19] N. Barton, TBM tunnelling in jointed and faulted rock. Rotterdam: Balkema, 2000.

[20] Barton, N. and E. Grimstad, 2014. Tunnel and cavern support selection in Norway, based on rock mass classification with the Q-system. Norwegian Tunnelling Society, NFF, Publ. 23. p. 39, 2014.

[21] A. Arild Palmström y H. Stille, Rock Engineering, 2nd edition. Thomas Telford Ltd, 2014.

[22] Barton, N., Choubey, V. "The shear strength of rock joints in theory and practice". Rock Mechanics 10, 1–54 (1977).

[23] N. Barton and S. Bandis, "Effects of Block Size on the Shear Behavior of Jointed Rock." in Proceedings - Symposium on Rock Mechanics, 1982.

[24] G. Tolson, "Un Catálogo de Indicadores Cinemáticos en Rocas Cizalladas", Depto. de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

[25] Z. T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses," Civ Eng S Afr, vol. 11, no. 5, pp. 335–343, 1973.

[26] L. I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, and C. Oteo, Ingeniería Geológica. Madrid, España: Pearson Education, 2002.

[27] Brown E.T (Ed.), "Rock characterization, testing and monitoring," in ISRM suggested methods, 1981.

[28] A. Aydin and A. Basu, "The Schmidt hammer in rock material characterization," Eng. Geol., 2005.

[29] P. Sumner y W. Nel, "The effect of rock moisture on Schmidt hammer rebound: tests on rock samples from Marion Island and South Africa", Earth Surface Processes and Landforms, vol. 27, n.º 10, pp. 1137–1142, 2002.