



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La universidad católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS

**Caracterización geomecánica del macizo rocoso, para su aplicación en
geotécnia, en el sector Lucarqui, Loja-Ecuador.**

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: González Maldonado, Ana Gabriela

DIRECTOR: Soto Luzuriaga, John Egvertto, M.Sc.

LOJA - ECUADOR

2018



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2018

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magister.

John Egverto Soto Luzuriaga.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: Caracterización geomecánica del macizo rocoso, para su aplicación en geotécnia, en el sector Lucarqui (Loja-Ecuador), realizado por González Maldonado Ana Gabriela, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, febrero 2018

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo González Maldonado Ana Gabriela” declaro ser autora del presente trabajo de titulación: **Caracterización geomecánica del macizo rocoso, para su aplicación en geotécnia, en el sector Lucarqui (Loja-Ecuador)**, de la Titulación de Geología y Minas, siendo John Egverto Soto Luzuriaga director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos, y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f)

Autor: González Maldonado Ana Gabriela

Cédula: 1104093644

DEDICATORIA

A mis padres , Sr. Ernesto Yamil González e Ing. Gina Pahola Maldonado, pilar fundamental de mi vida, quienes con su esfuerzo y dedicación me han brindado una excelente educación a lo largo de mi trayectoria, su cariño y apoyo incondicional en todo momento ha sido y seguirá siendo mi mayor fortaleza, a mi abuelito, Dr. Julio Oswaldo González, ejemplo de perseverancia, lucha y trascendencia, a mi hermano y compañero David Alejandro González, a mi madrina Lic. Maria Enith Maldonado por su cariño y rotundo apoyo.

AGRADECIMIENTO

Mi inmenso agradecimiento a mi director de tesis M.Sc John Egverto Soto por su guía, apoyo y experiencia académica brindada durante mis años académicos de aprendizaje, a mis docentes quienes me han compartido y han sido portadores de sabiduría y experiencia en el campo de la geología y minería, a mis amigos y compañeros de labores de campo Ing. Diego Castillo e Ing. Juan Viteri quienes contribuyeron de manera muy significativa a la realización de este trabajo, a mis amigos Ing. Alex Cárdenas Rodríguez y Ec. Hugo Fabian Castillo por su apoyo incondicional y motivación en cada paso, con quienes he aprendido que los jóvenes vivimos de sueños que nosotros mismos los hacemos realidad, y de manera muy especial a mi amiga Jessica Alvear Celi por su sinceridad, apoyo y sabios consejos.

INDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
INDICE DE CONTENIDOS	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS.....	5
CAPITULO I	6
CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
1.1. Ubicación y Acceso.....	7
1.2. Clima	8
1.3. Hidrografía	8
1.4. Contexto geológico, geodinámico y geomorfológico regional.....	9
1.4.1. Geología Regional.	9
1.4.2. Geología Estructural Regional.....	11
CAPITULO II.....	12
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Macizos rocosos	13
2.1.1. Propiedades Físico mecánicas de la matriz rocosa.....	14
2.1.2. Discontinuidades	15
2.1.3. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos	17
CAPITULO III.....	32
METODOLOGÍA Y MATERIALES	32
3.1. Trabajo en gabinete	33
3.2. Trabajo de Campo.....	33
3.2.1. Identificación del Macizo	33
3.2.2. Levantamiento geológico	34

3.2.3.	Obtención de datos geomecánicos	35
3.3.	Análisis de laboratorio	40
3.3.1.	Ensayo de compresión simple.....	40
3.3.2.	Rebote al martillo de bajo impacto.	41
3.3.3.	Ensayo Tilt Test	44
3.3.4.	Análisis Mineralógico.....	44
3.3.5.	Análisis químico.....	46
CAPÍTULO IV.....		47
RESULTADOS		47
4.1.	Caracterización geológica del sector.....	48
4.2.	Parámetros físico-mecánicos del macizo rocoso	50
4.3.	Clasificación geomecánica del macizo rocoso.	53
4.3.1.	RQD	53
4.3.2.	RMR.....	55
4.3.3.	S.M.R.....	58
4.3.4.	Q BARTON	62
4.3.5.	GSI	65
4.4.	Parámetros de rotura, método de Hoek & Brown	67
CAPÍTULO V.....		70
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		70
CONCLUSIONES.....		72
RECOMENDACIONES		73
BIBLIOGRAFÍA		74
ANEXOS		77
ANEXO 1. ZONIFICACIÓN DE LA ZONA 1		78
ANEXO 2. OBTENCIÓN DE DATOS GEOMECÁNICOS EN CAMPO		79
ANEXO 3. DATOS GEOMECÁNICOS ORDENADOS POR FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES.....		80

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del tramo de estudio	7
Tabla 2. Grado de meteorización de la roca.	14
Tabla 3. Propiedades Físico-Mecánicas de la matriz rocosa.	15
Tabla 4. Tipos de discontinuidades	15
Tabla 5. Métodos de clasificación geomecánica de macizos rocosos	17
Tabla 6. Índice de calidad de la roca (RQD)	18
Tabla 7. Parámetros del RMR básico	19
Tabla 8. Orientación de las discontinuidades en el talud.....	20
Tabla 9. Rugosidad de acuerdo a índice de rugosidad JRC.....	22
Tabla 10. Valores RMR básico	25
Tabla 11. Factores de ajuste para las discontinuidades.	26
Tabla 12. Factores de ajuste según el método de excavación.....	26
Tabla 13. Funciones continuas para F1, F2 y F3. A: paralelismo entre la discontinuidad y dirección de la superficie del talud; B: buzamiento de la discontinuidad; C: Relación entre el buzamiento de la discontinuidad y el talud.	26
Tabla 14. Clasificación SMR.....	27
Tabla 15. Valores de los parámetros característicos del índice Q	28
Tabla 16. Valores de los parámetros característicos del índice Q	29
Tabla 17. Valoración del macizo rocoso según el Q de Barton.	29
Tabla 18. Estimación del índice GSI en base a descripciones geológicas in situ.	31
Tabla 19. Corrección para reducción de la medida del índice de rebote del martillo de Schmidt cuando el martillo no se encuentra en la posición vertical.....	42
Tabla 20. Zonas litológicas del tramo de estudio	51
Tabla 21. Resumen de datos obtenidos en ensayos de laboratorio.	52
Tabla 22. Cálculo de ángulo de fricción residual ϕ_r y JCS.....	53
Tabla 23. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del RQD (Zona 1)	53
Tabla 24. Resultados del RQD	54
Tabla 25. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del RMR (Zona 1)	56
Tabla 26. Resultados RMR	56
Tabla 27. Resultados del RMR	57
Tabla 28. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del SMR, mecanismo de rotura planar (Zona 1).....	59
Tabla 29. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del SMR, mecanismo de rotura tipo vuelco (Zona 1).....	59
Tabla 30. Resultados del SMR, mecanismo de rotura planar	60
Tabla 31. Resultados del SMR, mecanismo de rotura tipo vuelco	61
Tabla 32. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del índice Q Barton	63
Tabla 33. Resultados del índice Q de Barton.....	63
Tabla 34. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del índice GSI.....	66
Tabla 35. Resultados del índice GSI	66

Tabla 36. Parámetros de rotura Hoek-Brown.....	68
--	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio	7
Figura 2. Recorrido Loja-Lucarqui.....	8
Figura 3. Esquema de los dominios litotectónicos del sur del Ecuador, donde se representa la ubicación de la Cuenca Alamor Lancones.....	9
Figura 4. Secuencia Estratigráfica de la Cuenca Alamor Lancones	10
Figura 5. Geología Regional, fragmento hoja geológica Cariamanga (zona de estudio).	11
Figura 6. Representación esquemática de las características de las discontinuidades	16
Figura 7. Puntaje de acuerdo al esfuerzo de la roca intacta y valor del índice RQD.	20
Figura 8. Puntaje de acuerdo al espaciamiento y longitud de las discontinuidades	21
Figura 9. Puntaje de acuerdo al espaciamiento de las discontinuidades	21
Figura 10. Perfiles típicos de rugosidad para cada rango de JRC, muestras de 200mm y 1m.	22
Figura 11. Relación entre Jr., sistema Q y JRC para muestras de 200mm y 1m en el sistema RMR	23
Figura 12. Medida de amplitud y longitud de la aspersion de la junta	24
Figura 13. Gráfico para determinar el JRC en función de la amplitud y longitud de la discontinuidad.....	24
Figura 14. Campaña de recorrido del tramo de 1.33 km para identificación de las zonas litológicas de estudio.	34
Figura 15. Ficha de Zonificación.....	36
Figura 17. Ficha de toma datos para caracterización del macizo rocoso.....	37
Figura 17. Campaña de toma de datos geomecánicos, a) Colocación de línea de escaneo, b) medida de separación, c) y d) medida de longitud (rumbo-buzamiento), e) medida de aberturas, f) y g) ejecución de ensayo de esclerometría de bajo impacto, h) medida de rugosidad peine de barton.....	38
Figura 18. Campaña de testificación, a) ejecución de la labor de perforación, b) recuperación de testigo de perforación, c) personal de campo junto al total de muestras extraídas.	39
Figura 19. Corte, pulido y recodificación de testigos.	40
Figura 20. Ensayo de resistencia a la compresión simple.....	41
Figura 21. Valores típicos de resistencia para la mayoría de las rocas, en función del índice de rebote y su densidad.	42
Figura 22. Ejecución y medición del valor de rebote R con martillo Schmidt de bajo impacto.	43
Figura 23. Esquema y ejecución del ensayo Tilt Test en núcleos de roca.	44
Figura 24. Campaña de laboratorio, a la izquierda maquina cortadora de roca LAPRO 48; a la derecha núcleos y secciones delgadas correspondientes zonas litológicas.	45
Figura 25. Campaña de laboratorio; a) análisis mineralógico mediante microscopia óptica; b) análisis mineralógico mediante cámara ocular.....	45
Figura 26. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X.....	46
Figura 27. Clasificación Tas (Total Alkali Silica).....	46
Figura 28. Mapa litológico de la zona de estudio	48

Figura 29. De izquierda a derecha tenemos; a) roca andesítica con mineralización de pirolusita, b) roca andesítica de composición básica, c) toba andesítica de lapilli, d) andesita con presencia de xenolitos de toba de lapilli.....	49
Figura 30. Análisis mineralógico de muestras mediante microscopio.	50
Figura 31. Mapa de Zonificación del tramo de estudio Abs: 27+530 a 28+860.....	51
Figura 32. Mapa Clasificación RQD.....	55
Figura 33. Mapa Clasificación R.M.R.....	58
Figura 34. Mapa Clasificación R.M.R. mecanismo de rotura planar.....	61
Figura 35. Mapa Clasificación R.M.R. mecanismo de rotura por vuelco.....	62
Figura 36. Mapa Clasificación Q Barton.....	65
Figura 37. Mapa Clasificación sistema GSI.....	67
Figura 38. Envoltentes de rotura, criterio Hoek- Brown.....	69

RESUMEN

La presente investigación se realiza con el fin de obtener los parámetros físico mecánicos para la caracterización geomecánica del macizo rocoso en un tramo de vía de 1.33 km en el sector de Lucarqui, utilizando equipos de campo especializados para dicho fin como lo son: peine de Barton, esclerómetro de bajo impacto y brújula; así como ensayos de laboratorio: compresión simple, densidad, esclerometría en núcleos y ensayo Tilt Test. Producto de este trabajo se ha obtenido una serie de parámetros físico-mecánicos que permiten determinar el comportamiento y la calidad del macizo rocoso utilizando 5 clasificaciones principales: RQD, RMR, SMR, Q BARTON y GSI, así como el método de caracterización más idóneo para la zona de estudio. Con los datos obtenidos de la caracterización se determina los parámetros de rotura del macizo aplicando el método de Hoek-Brown. Los resultados obtenidos durante la investigación determinan que la calidad del macizo rocoso es de tipo II (Buena) y tipo III (Regular), cuya evaluación determina que el comportamiento mecánico del macizo rocoso en la zona de estudio es estable o parcialmente estable.

PALABRAS CLAVE:

Macizo rocoso, caracterización geomecánica, RQD, RMR, SMR, Q BARTON, GSI

ABSTRACT

The present investigation is carried out in order to obtain the physical mechanical parameters for the geomechanical characterization of the rock mass in a section of 1.33 km road in the Lucarqui sector, using specialized field equipment for this purpose such as: Barton comb, low impact sclerometer and compass; as well as laboratory tests: simple compression, density, sclerometry in nuclei and Tilt Test. As a result of this work we have obtained a series of physical-mechanical parameters that allow us to determine the behavior and quality of the rock mass using 5 main classifications: RQD, RMR, SMR, Q BARTON and GSI, as well as the most suitable characterization method for the study area. With the data obtained from the characterization the mass breakage parameters are determined applying the Hoek-Brown method. The results obtained during the investigation determine that the quality of the rock mass is of type II (Good) and type III (Regular), whose evaluation determines that the mechanical behavior of the rock mass in the study area is stable or partially stable

KEYWORDS: rock mass, geomechanical characterization, RQD, RMR, SMR, Q BARTON, GSI.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la calidad y estabilidad de macizos rocosos tiene una gran importancia en la ingeniería civil y geotécnica puesto que, al determinar los parámetros físicos-mecánicos de un macizo, obtendremos información necesaria para minimizar consecuencias catastróficas en cuanto a vida y propiedad, gracias a estos estudios podemos evitar errores de diseño, construcciones con deficiencias, deterioro, daño a obras adyacentes, etc.

En la provincia de Loja, los problemas en la viabilidad por causas geológicas son diversos, entre uno de ellos se encuentra la calidad de macizos rocosos en los taludes, especialmente en los tramos donde predomina macizos rocosos. Como lo es el caso de la vía que va desde el sector El Naranjo hasta el Empalme, en la cual siempre existen caídas de rocas en la calzada lo que ha ocasionado varios problemas de tránsito y avería en los vehículos y a veces accidentes trágicos. Por ello la presente investigación pretende caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso, con el fin de determinar el comportamiento, calidad y estabilidad para su aplicación en ingeniería geotécnica, que al final permita solventar esta problemática en la zona. para ello se ha utilizado 5 clasificaciones geomecánicas: RQD, R.M.R (Bieniawski), S.R.M. (Romana), Q (Barton), GSI (Hoek & Brown). Esta descripción y caracterización es relevante debido a la gran cantidad de obras que sobre estos se desarrollan, por tal motivo se hace necesario realizar una serie de estudios y ensayos con el fin de conocer las características del macizo. Además la investigación conlleva a la obtención de parámetros de rotura del macizo rocoso aplicando los criterios de Hoek & Brown.

La memoria que aquí se presenta se estructura en 5 capítulos como se indica a continuación:

CAPITULO I: presenta las características físico geográficas de la zona de estudio

CAPITULO II: descripción del marco teórico haciendo énfasis en la temática de macizos rocosos, sus propiedades físico-mecánicas y las clasificaciones geomecánicas más representativas para la determinación del comportamiento y calidad de un macizo rocoso.

CAPITULO III: se describe la metodología utilizada para la presente investigación, como lo es: trabajo en gabinete, trabajo de campo y el análisis de laboratorio.

CAPITULO IV: presenta los resultados obtenidos con la investigación, la caracterización geológica del sector, los parámetros físico-mecánicos del macizo rocoso, los cálculos realizados en base a las 5 clasificaciones: RQD, RMR, SMR, Q BARTON, GSI y los parámetros de rotura

basados en el método de Hoek & Brown con el fin de determinar el comportamiento y calidad del macizo rocoso.

CAPITULO V: Analiza los resultados obtenidos con la investigación, determinando la clasificación más idónea para caracterizar al macizo rocoso en base a su comportamiento y calidad.

OBJETIVOS

Objetivo General

Caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso, con el fin de determinar el comportamiento, calidad y estabilidad para su aplicación en ingeniería geotécnica, en el sector Lucarqui (Loja-Ecuador).

Objetivos Específicos

- Caracterizar la geología del sector.
- Determinar los parámetros físico-mecánicos del macizo rocoso.
- Clasificar geomecánicamente el macizo rocoso
- Obtener parámetros de rotura plástica y elástica con la aplicación de los métodos de Hoek & Brown.
- Manejar de forma adecuada los datos de campo y equipo para caracterizar el macizo rocoso.

CAPITULO I

CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1. Ubicación y Acceso

El tramo de estudio se encuentra ubicado en la vía Panamericana Sur E35 en el sector Lucarqui de la parroquia rural Guachanamá, cantón Paltas, provincia de Loja (Fig. 1), corresponde a 1.33 km de longitud comprendido entre las abscisas 27+530 a 28+860 del mercado vial, entre las coordenadas siguientes (Tabla 1), en proyección UTM y DATUM WGS 84, zona 17S.

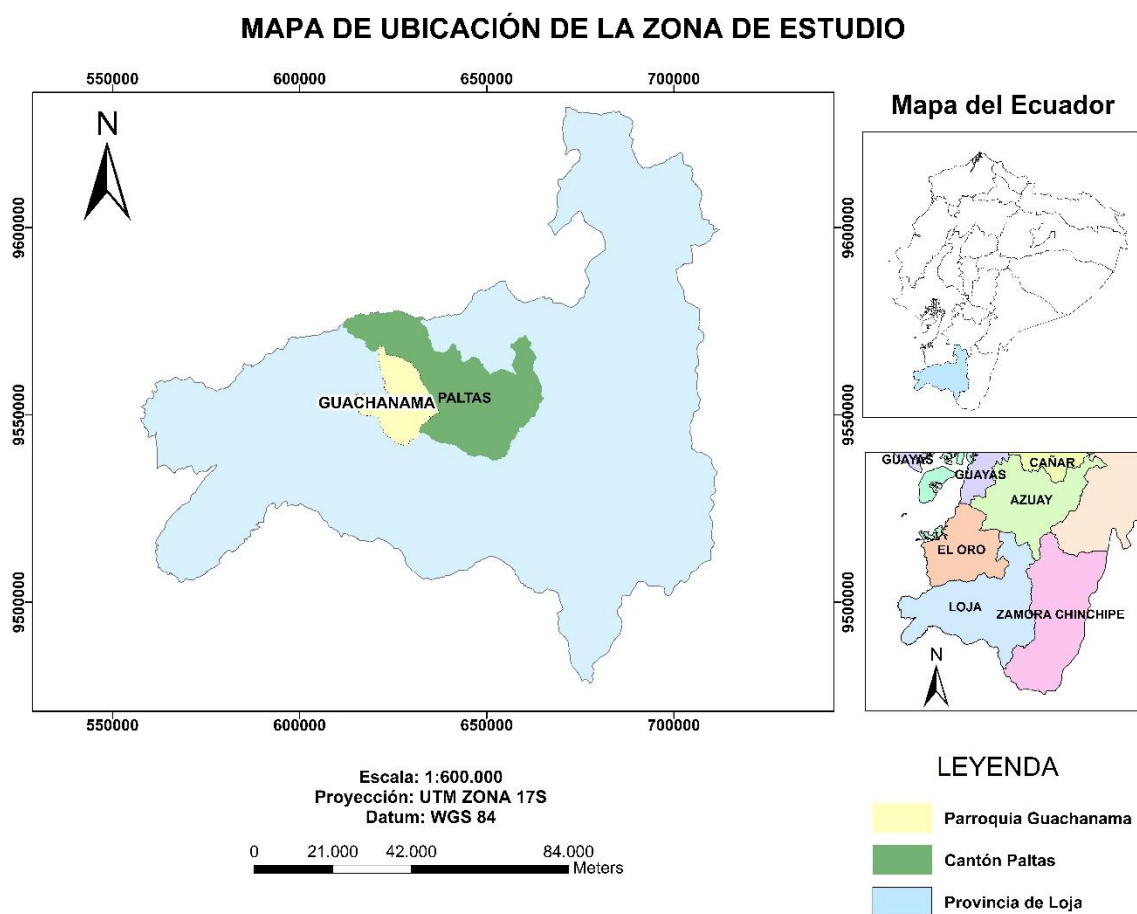


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Tabla 1. Coordenadas del tramo de estudio

COORDENADAS	ESTE (X)	NORTE (Y)	ALTURA (Z)
Inicio del tramo	630510	9543423	884
Fin del tramo	639019	9543825	810

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

El principal acceso a este sector es por la vía de primer orden E35 desde la ciudad de Loja pasando por el cantón de Catamayo y las parroquias Catacocha y Casanga pertenecientes al

cantón Paltas, el recorrido es de 134 km con una duración de 2 horas 23 min aproximadamente (Fig. 2).

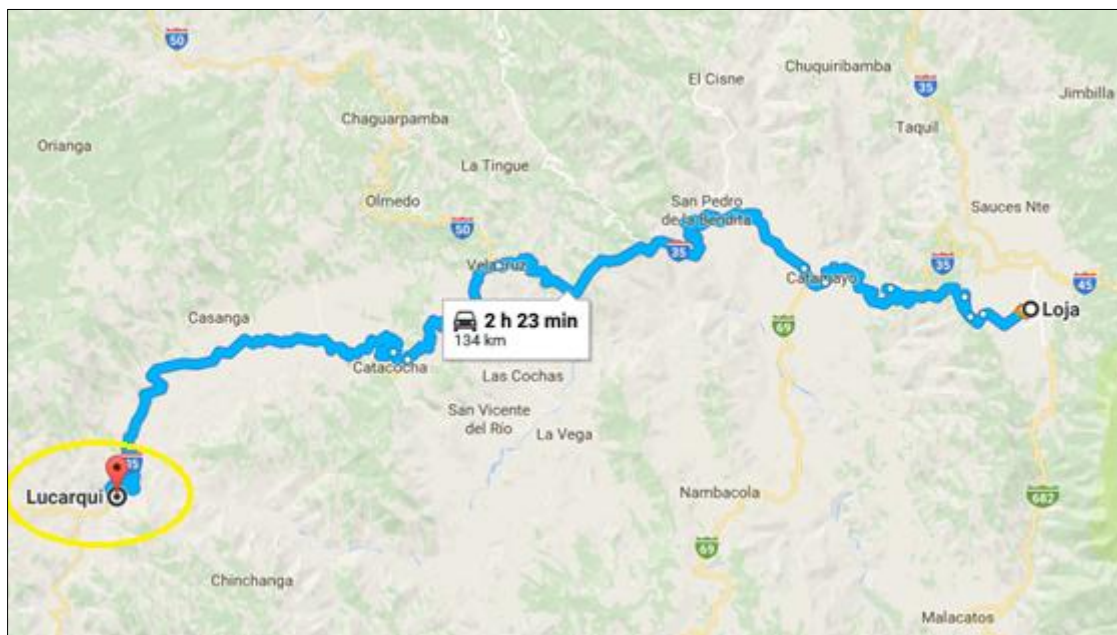


Figura 2. Recorrido Loja-Lucarqui

Fuente: Google Earth

Elaborado: por la autora

1.2. Clima

Según el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Paltas (GAD del cantón Paltas, 2011). “El cantón Paltas posee varios pisos climáticos”, en la parroquia rural de Guachanamá se destaca el clima seco y cálido húmedo. Posee una temperatura promedio de 14°C a 20°C. La precipitación varía desde los 700 mm hasta los 1500 mm, con una precipitación media de 1018 mm al año. Los meses más secos son junio, julio, agosto y septiembre con 3 mm, mientras que los meses con las mayores precipitaciones del año son enero, febrero, marzo y abril con 232 mm.

1.3. Hidrografía

El territorio de acuerdo a la red hídrica, es parte de las cuencas del río Catamayo localizado en la parte oriental y el río Puyango–Tumbes en la parte occidental, esta red hídrica además está conformada por las subcuencas del río Tamine, río Alamor, río Yaguachi y drenajes menores (PALTAS, 2014)

1.4. Contexto geológico, geodinámico y geomorfológico regional

1.4.1. Geología Regional.

Durante el cretácico, en la parte occidental del Ecuador en un ambiente posiblemente en principio extensivo y posteriormente dextral, se produce la rotación del Bloque Amotape Tahuín (BAT) y la desmembración de este Bloque del Arco Loja Olmos y como consecuencia se produce la formación de la cuenca Alamor Lancones (Fig. 3) interpretada como un “rift” abortado con una dirección NE-SW (Tegart, Gordon, & Carstensen, 2000)., este hecho explica los aportes sedimentarios (LITHERLAND, 1994) desde el BAT para la serie sedimentaria occidental y los aportes volcánicos oceánicos para la serie sedimentaria oriental de la Cuenca Alamor Lancones (Eguez & Poma, 2001).

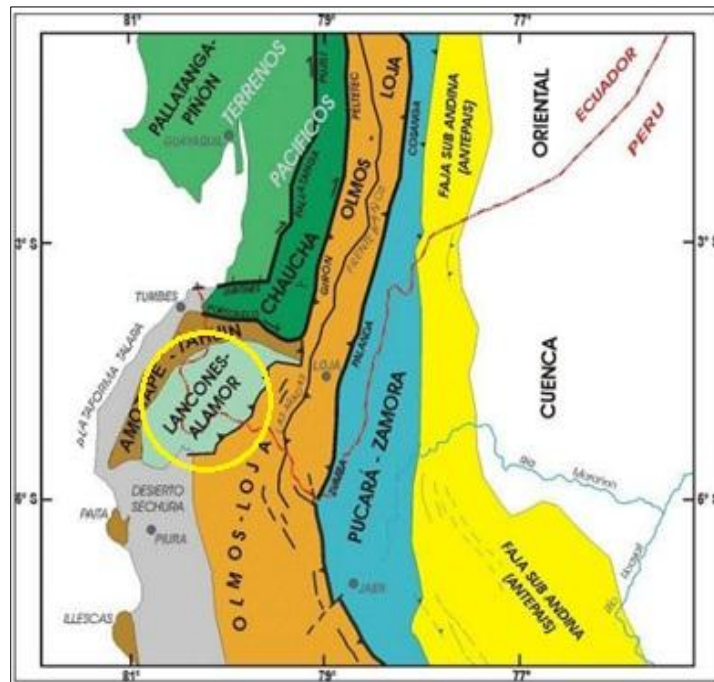


Figura 3. Esquema de los dominios litotectónicos del sur del Ecuador, donde se representa la ubicación de la Cuenca Alamor Lancones.

Fuente: Litherland, 1994

Elaborado: por la autora

La cuenca Alamor Lancones se encuentra rellena de varias secuencias litológicas dominantes que consisten en facies metamórficas, intrusivas graníticas, volcánicas y volcano sedimentarias, además de algunos depósitos sedimentarios. Esto conlleva a dividir a la cuenca en dos regiones denominadas serie Oriental y Occidental (Eguez y Poma, 2001).

Serie Oriental

La serie sedimentaria oriental que sobryace a la Formación Punta de Piedra incluye a las siguientes formaciones: Celica, Ciano, Zambí, Naranjo, Casanga, Sacapalca, Gonzanamá y culminando con Formación Río Playas (Fig.4).

Serie Occidental

La serie sedimentaria occidental que sobryace a las rocas metamórficas del BAT incluye las formaciones Grauvacas basales y Bosque de Piedra, Puyango, Cazaderos y culminando con las facies tipo flysh de la Formación Zapotillo (Fig.4).

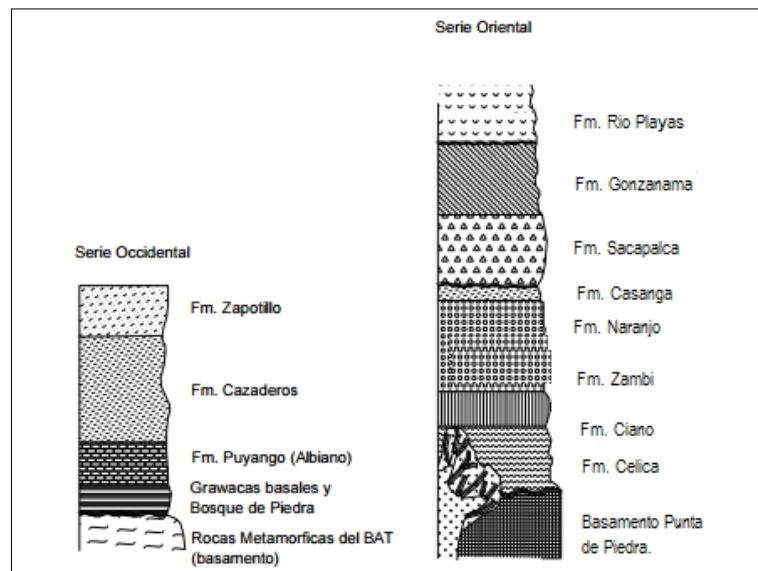


Figura 4. Secuencia Estratigráfica de la Cuenca Alamor Lancones
Fuente: Eguez y Poma, 2001
Elaborado: por la autora

La geología regional de la zona de estudio es representada por la Formación Punta de Piedra y Formación Celica.

La Formación Punta de Piedra de edad Cretácico Inferior (Aptiense), comprende una secuencia representada principalmente por basaltos de afinidad toleítica de color negro verdoso, textura afanítica y gabros en menor proporción que constituyen cuerpos intrusivos pequeños de color

negro y textura fanerítica. Esta unidad se encuentra sobreyacida por la Unidad Celica e intruída por el Batolito de Tangula (INIGEMM, 2012).

La Formación Celica de edad Cretácica (Albiense) posee litologías que comprenden entre andesitas masivas de color gris verdoso intercaladas con tobas andesíticas hasta riolíticas muy meteorizadas y lavas andesíticas a andesitas basálticas. Entre las rocas volcánicas de la Formación Celica se encuentran esporádicas intercalaciones de caliza y areniscas (Ludeña, 2016). Su espesor alcanza hasta 5000 m y es intruída por el batolito granítico de Tangula.

1.4.2. Geología Estructural Regional

La Cuenca Alamor Lancones corresponde a una Cuenca Oceánica Marginal Cretácica desarrollada por el desmembramiento del Bloque Amotape Tahuin (BAT) producto del proceso de rotación a lo largo de la Falla Las Aradas (Eguez & Poma, 2001). En la hoja geológica de Cariamanga (INIGEMM, 2012) las fallas regionales tienen una dirección preferencial NE-SO ubicadas hacia el Oeste y una falla en dirección aproximada N-S, dentro de las fallas que atraviesan el área tenemos la falla Yamana que tiene rumbo general NE-SO.

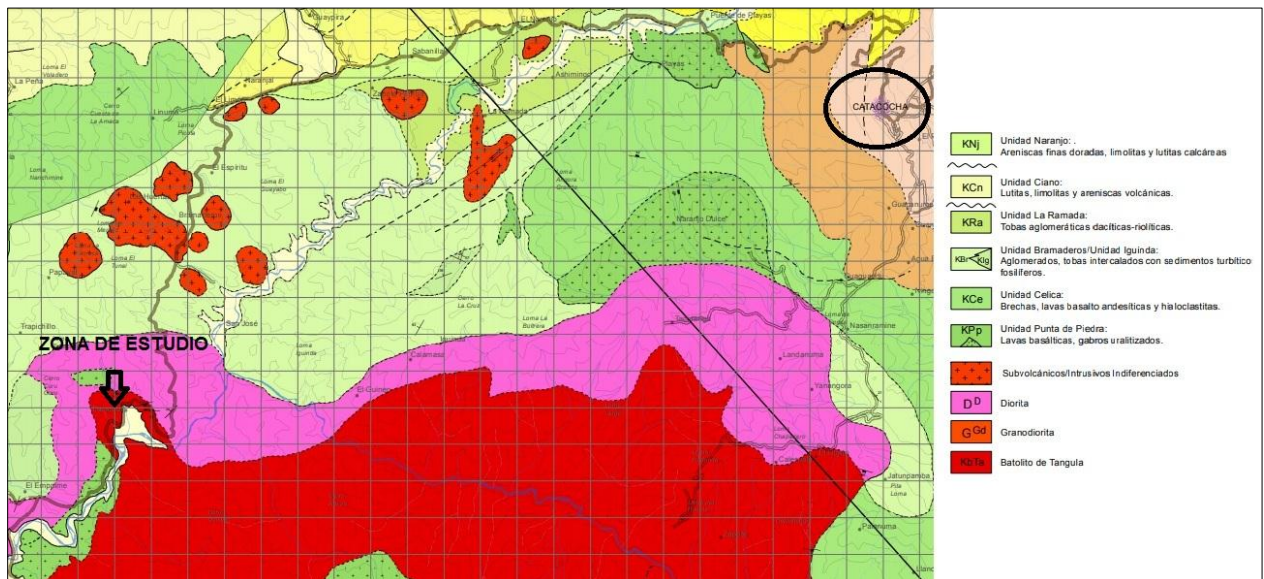


Figura 5. Geología Regional, fragmento hoja geológica Cariamanga (zona de estudio).
 Fuente: INIGEMM,2012
 Elaborado: por la autora

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Macizos rocosos

Son la forma en la que se presentan las rocas en un medio natural (afloramientos), un macizo rocoso está compuesto por una o varios tipos de rocas que se encuentran afectadas por discontinuidades o superficies de debilidad, dentro de los principales tipos de discontinuidades presentes en un macizo rocosos tenemos: planos de estratificación, diaclasas, fallas, juntas y pliegues. Se conoce también a los macizos rocosos como medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos, es discontinuo puesto que fallas, juntas, diques, etc., llegan a romper con la continuidad de la matriz rocosa y/o roca intacta; anisótropa cuando sus propiedades mecánicas varían dependiendo de la dirección en la que es estudiado o medido; y heterogéneo puesto que existe una variabilidad de sus propiedades físicas y mecánicas en distintas zonas del macizo.

En un macizo rocoso se presentan dos tipos de estructuras denominadas estructura primaria y secundaria, la estructura primaria está dada por la génesis de las rocas, las estructuras secundarias en cambio son el producto de la acción de esfuerzos desarrollados en la masa rocosa debido a los esfuerzos tectónicos, estas estructuras se pueden presentar aisladas o sobrepuestas entre sí, y se manifiestan localmente en discontinuidades y regionalmente como fallas y pliegues (Anónimo, 2010).

Para caracterizar o describir un macizo rocoso se considera las características generales del mismo, entre las cuales tenemos:

- Litología: Se describe el tipo de roca
- Resistencia: En terreno la resistencia de una roca se determina en relación al número de golpes que son necesarios para fracturar la roca.
- Grado de meteorización: es la descomposición física y química de la roca al estar expuesta a agentes atmosféricos (Tabla 2).

Condiciones hidrogeológicas: el agua fluye a través del macizo rocoso dependiendo de las fisuras, micro fisuras y porosidad de la roca, este hecho influye en el comportamiento mecánico del macizo.

Tabla 2. Grado de meteorización de la roca.

TERMINO	DESCRIPCION	GRADO
Inalterada o Roca Fresca	No presenta signos visibles de meteorización en la roca	I
Levemente Alterada	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar extremadamente algo más débil, que en su condición fresca	II
Moderadamente Alterada	Menos de la mitad de la roca está descompuesta y o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos.	III
Muy Alterada	Más de la mitad de la roca está descompuesta y o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos	IV
Completamente meteorizada	Toda la roca está descompuesta y o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta	V
Suelo residual	Toda la roca está convertida como suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran transporte significativamente	VI

Fuente: ISRM, 1981

Elaborado y editado: por el autor

2.1.1. Propiedades Físico mecánicas de la matriz rocosa.

Para la correcta evaluación de la matriz rocosa, es necesario conocer sus principales características físicas y mecánicas, estas propiedades se obtienen por observación en campo, y por medio de ensayos de laboratorio.

Las propiedades físicas de las rocas son el resultado de su composición mineralógica, génesis, procesos de alteración y meteorización físico química, se evalúan a través de un levantamiento geológico a detalle.

Las propiedades mecánicas dependen de la variabilidad de las propiedades físicas para poder determinar el comportamiento mecánico del macizo rocoso, evaluado por medio de ensayos de laboratorio

Existen varios parámetros que se utilizan para identificar las propiedades de las rocas y los métodos para su determinación, a continuación, se detallan las propiedades a determinarse en el presente trabajo (Tabla 3).

Tabla 3. Propiedades Físico-Mecánicas de la matriz rocosa.

	PROPIEDADES	METODOS DE DETERMINACION
PROPIEDADES FÍSICAS	Composición mineralógica Tipos de roca Génesis y textura Color	Descripción visual (Campo)
PROPIEDADES MECANICAS	Resistencia a la compresión simple	Ensayo de compresión simple Martillo Schmidt

Fuente: Libro de Ingeniería Geológica, González Vallejo, 2002
Elaborado y modificado: por la autora

2.1.2. Discontinuidades

El comportamiento de macizo rocoso está establecido por las discontinuidades o superficies de debilidad que son aquellas que separan los bloques de matriz rocosa y dan como resultado un macizo, su reconocimiento es de suma importancia para el estudio del comportamiento mecánico e hidrogeológico del macizo rocoso.

2.1.2.1. Tipos de discontinuidades.

En la Tabla 4 se han agrupado los diferentes tipos de discontinuidades en sistemáticas y singulares, sistemáticas cuando aparecen en familias, y singulares cuando existe un solo plano que atraviese el macizo rocoso.

Tabla 4. Tipos de discontinuidades

DISCONTINUIDADES	SISTEMÁTICAS	SINGULARES
Planares	-Diaclasas o juntas	-Fallas -Diques

Fuente: Libro de Ingeniería Geología, González de Vallejo, 2004
Elaborado: por la autora

2.1.2.2. Características para las discontinuidades.

(Rodríguez, 2007) manifiesta las características de las discontinuidades, las características que a continuación se evalúan han sido tomadas en campo y en laboratorio a través de los sistemas de clasificación geomecánica.

- Orientación.- valores de la dirección o rumbo y el buzamiento

- Espaciamiento.- es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de una misma familia, este determina el tamaño de los bloques de roca intacta a mayor espaciado los bloques serán más grandes, además, juega un papel importante en la permeabilidad del macizo rocoso.
- Continuidad.- es la longitud de la traza de una discontinuidad en un afloramiento. Cuando hay persistencia se garantiza el flujo de agua a través de la roca, cuanto menos es la persistencia, la masa rocosa será más estable.
- Abertura.- es la distancia perpendicular entre las paredes de las diaclasas, a menor apertura las condiciones del macizo rocoso serán más favorables.
- Rugosidad.- es la irregularidad y ondulación de la discontinuidad, ambas afectan la resistencia del macizo rocoso. Una alta rugosidad aumenta la resistencia a la fricción.
- Relleno.- material que se encuentra dentro de las paredes de la discontinuidad, casi siempre más blando que el macizo rocoso.
- Resistencia de las paredes de la discontinuidad.- es la resistencia a la compresión simple, que depende del tipo de matriz rocosa, de la existencia o no de relleno y del grado de alteración.
- Flujo.- agua presente en la discontinuidad.

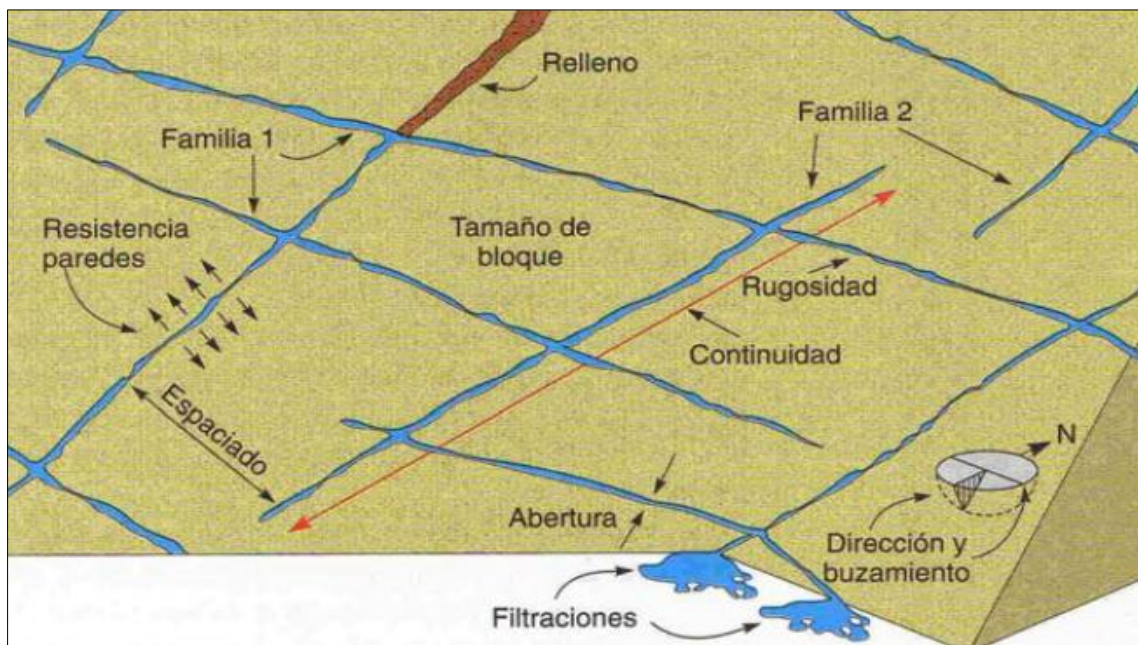


Figura 6. Representación esquemática de las características de las discontinuidades
Fuente: Libro de Ingeniería Geológica, González de Vallejo, 2002
Elaborado: Hudson, 1989

2.1.3. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos

Para determinar la calidad del macizo rocoso hay que tomar en cuenta varios factores que determinan su comportamiento mecánico:

- Propiedades de la matriz rocosa
- Frecuencias y tipo de discontinuidades, que definen el grado de fracturación, el tamaño, la forma de los bloques, sus propiedades hidrogeológicas, etc.
- Grado de meteorización o alteración
- Presencia de agua.

Debido a la variabilidad de estos factores, los criterios que vamos a utilizar en el presente trabajo para clasificar al macizo rocoso están basados en métodos cualitativos y cuantitativos conocidos como clasificaciones geomecánicas (Tabla 5).

Tabla 5. Métodos de clasificación geomecánica de macizos rocosos

Métodos Cualitativos	"RQD" Deere (1989)
Métodos Cuantitativos	"R.M.R." Bieniawski (1989)
	"SMR" Romana (1985)
	"Q" Barton (1974)
	"GSI" Hoek & Brown (1995)

Fuente: la autora

Elaborado y modificado: por la autora.

2.1.3.1. RQD (Rock Quality Designation).

El RQD es el índice de calidad de las rocas, fue propuesto entre 1963 por Deere basado en la recuperación de los núcleos con perforación, y se define como la sumatoria de las longitudes de los fragmentos ≥ 10 cm, dividida entre la longitud total del barreno (Deere, 1989). Esta clasificación a contando con algunas modificaciones por el mismo autor durante varios años en este caso utilizaremos la clasificación de 1989.

$$RQD = \frac{\sum (\text{longitud de fragmentos} \geq 10 \text{ cm})}{\text{longitud total perforada}} * 100\%$$

Cuando no se dispone de núcleos de perforación, existe otra alternativa para determinar el RQD se lo estima de acuerdo a la cantidad de discontinuidades existentes en el macizo rocoso por m³ (Palmstrom, 1982).

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

(Palmstrom, 2005), realiza una nueva correlación más adecuada que la anterior:

$$RQD = 110 - 2.5 J_v$$

$$RQD = 0 \text{ para } J_v > 44$$

$$RQD = 100 \text{ para } J_v < 4$$

Donde:

J_v_ Índice volumétrico de fisuras por cada m³

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{SM_i} \right)$$

SM_i_ Espaciamiento o separación medio de cada fisura en m

La relación entre el valor RQD y la calidad de la roca están designados en la Tabla 6:

Tabla 6. Índice de calidad de la roca (RQD)

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

Fuente: Deere, 1989
Elaborado: por la autora

2.1.3.2. RMR (Rock Mass Rating)

Esta clasificación es presentada por Bieniawski en 1973, ha contado con algunas modificaciones por el mismo autor durante varios años, en este caso utilizaremos la clasificación de (Bieniawski, ENGINEERING ROCK MASS CLASSIFICATIONS, 1989). Para obtener el índice RMR se suman 5 parámetros:

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Dónde:

- 1._Parámetro 1: resistencia a la compresión simple (Tabla 7 o Fig. 7)
- 2._Parámetro 2: grado de fracturamiento en términos del R.Q.D (Tabla 7 o Fig.7)
- 3._Parámetro 3: condición de las discontinuidades, se considera los siguientes parámetros: (Tabla 9 o Fig. 8-9)

- Abertura
- Continuidad
- Rugosidad
- Alteración
- Relleno

- 4._ Parámetro 4: condiciones hidrogeológicas (Tabla 7)
- 5._ Parámetro 5: orientación de las discontinuidades (Tabla 8)

Tabla 7. Parámetros del RMR básico

PARAMETRO			RANGO DE VALORES						
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo de Carga puntual	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25- 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Valor	20	17	13	8	3			
3	Espaciado de las discontinuidad		>2 m	0,6 – 2 m	0,2 - 0,6 m	0,06 -0,2 m	<0,06 m		
	Valor	20	15	10	8	5			
4	Condición de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Apertura	Nada	<0,1 mm	0,1 – 1,0 mm	1 – 5 mm	>5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5 mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5 mm	Relleno blando >5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
5	Flujo de Agua (Filtración)	Relación Presión agua/ Esfuerzo principal	0	0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	>0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
VALOR			15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski, 1989

Elaborado: por la autora

Tabla 8. Orientación de las discontinuidades en el talud

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20° Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento		Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°	
Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°	Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°	Muy desfavorable	Media	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable			

Fuente: Bieniawski, 1989

Elaborado: por la autora

Los valores o categorías que se asignan a cada parámetro se encuentran en la Tabla 7, (Bieniawski R. Z., 2011) manifiesta que los parámetros típicos se evalúan para cada conjunto discontinuo y los valores se interpolan utilizando curvas de clasificación, las curvas son útiles para eliminar una impresión de que se producen cambios abruptos en los valores entre categorías (Fig.7,8,9).

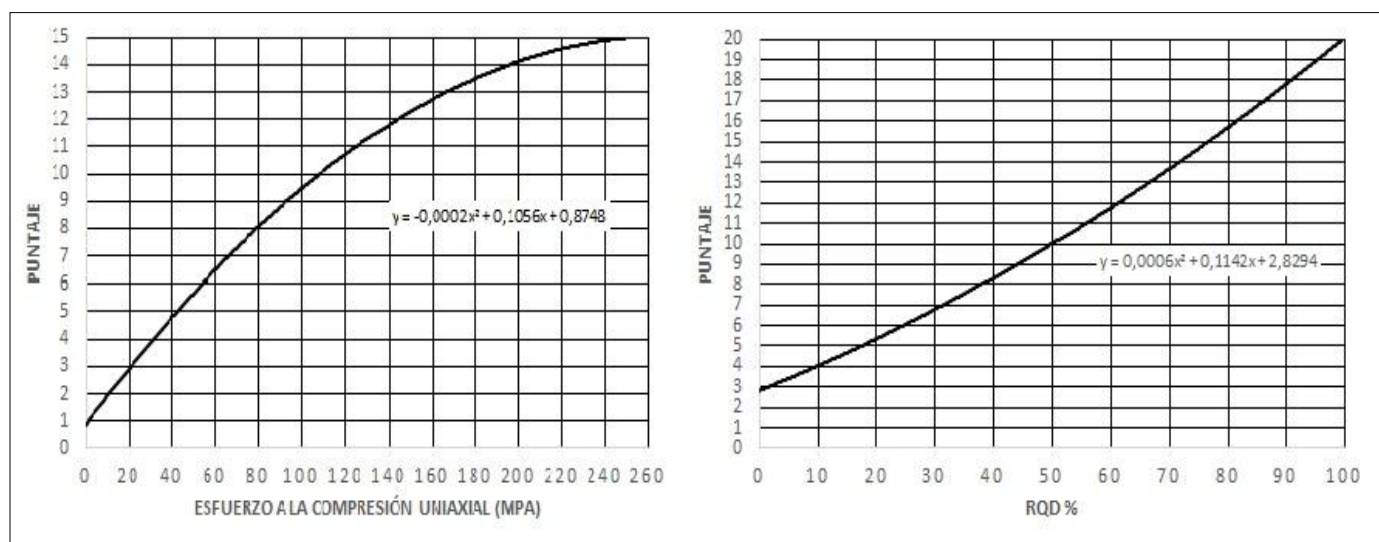


Figura 7. Puntaje de acuerdo al esfuerzo de la roca intacta y valor del índice RQD.

Fuente: Bieniawski, 1989

Elaborado: por la autora

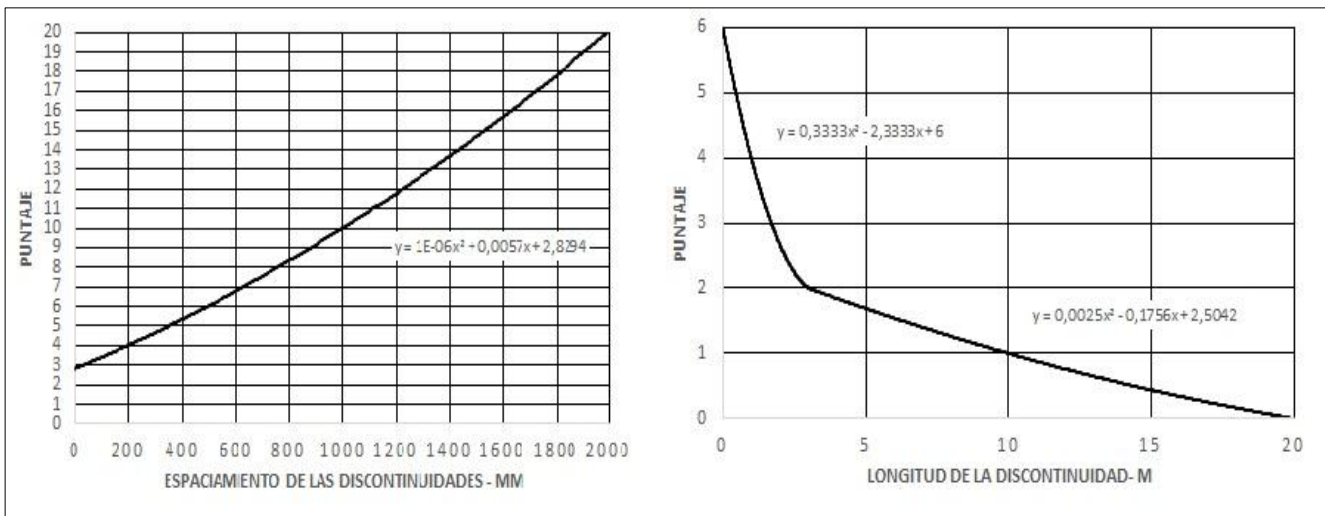


Figura 8. Puntaje de acuerdo al espaciamiento y longitud de las discontinuidades

Fuente: Bieniawski, 1989

Elaborado: por la autora

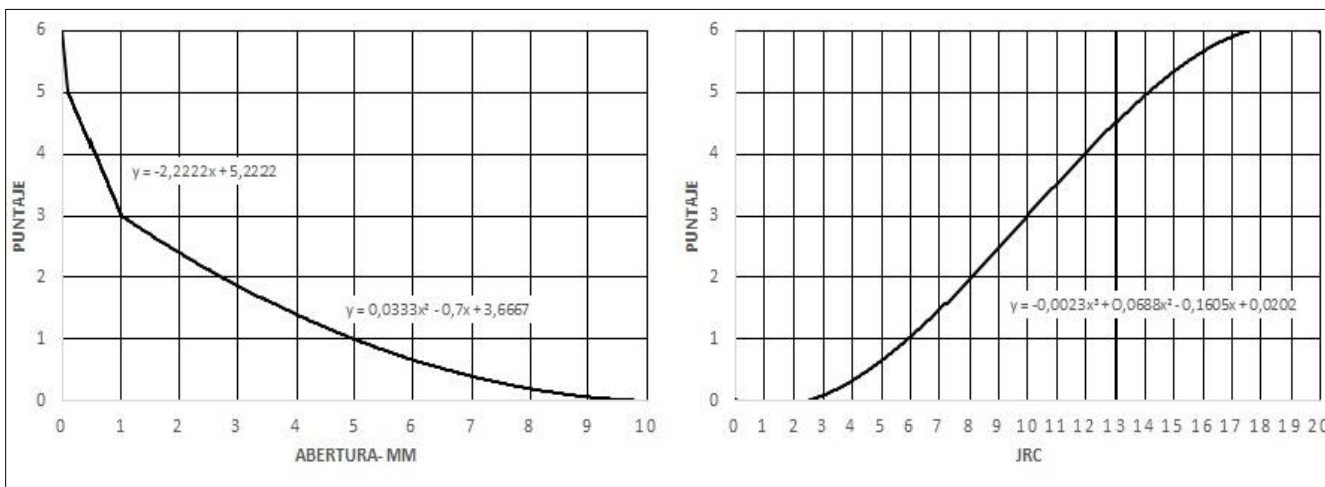


Figura 9. Puntaje de acuerdo al espaciamiento de las discontinuidades

Fuente: Bieniawski, 1989

Elaborado: por la autora

Bieniawski (1989) en su sistema RMR, evalúa la rugosidad en los rangos de muy rugoso a suave, en términos del índice JRC de 20 a 0 respectivamente (Tabla 9). Para la evaluación de la rugosidad se pueden utilizar los perfiles de Barton & Choubey (1977) mostrados en la Fig.10, o los perfiles de Barton & Bandis (1990) mostrados en la Fig.11, perfiles representativos para muestras de esa escala. El índice de rugosidad se determina por apreciación visual o por comparación con el peine de Barton, el cual es un dispositivo que replica el perfil de rugosidad de una discontinuidad tanto en campo como en muestras en laboratorio.

Tabla 9. Rugosidad de acuerdo a índice de rugosidad JRC

Muy rugosa JRC 20-16	Rugosa JRC 16-12	Ligeramente rugosa JRC 12-8	Ondulada JRC 8-4	Suave JRC 4-0
--------------------------------	----------------------------	---------------------------------------	----------------------------	-------------------------

Fuente: (Bieniawski, 1989)

Elaborado: por lo autora

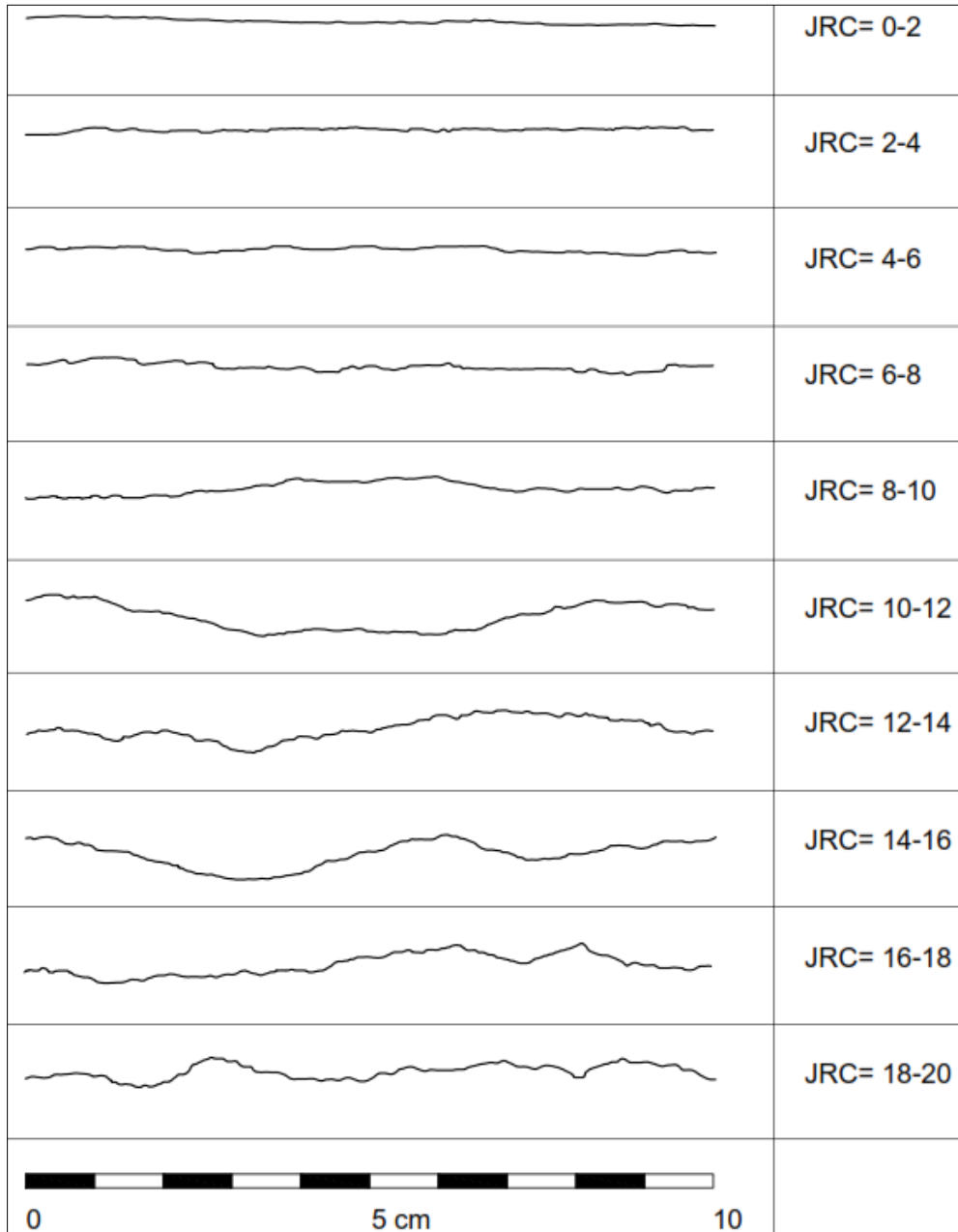


Figura 10. Perfiles típicos de rugosidad para cada rango de JRC, muestras de 200mm y 1m.

Fuente: Barton & Choubey, 1977

Elaborado: por la autora











Descripción	Perfil	Jr	JRC 200mm	JRC 1m
Rugosa		4	20	11
Lisa		3	14	9
Pulida		2	11	8
	Escalonada			
Rugosa		3	14	9
Lisa		2	11	8
Pulida		1.5	7	6
	Ondulada			
Rugosa		1.5	2.5	2.3
Lisa		1.0	1.5	0.9
Pulida		0.5	0.5	0.4
	Plana			
				

Figura 11. Relación entre Jr., sistema Q y JRC para muestras de 200mm y 1m en el sistema RMR
Fuente: Barton & Bandis, 1990
Elaborado: por la autora

Para la rugosidad, además de la apreciación visual a través de perfiles típicos mostrados anteriormente en la Fig.10 y Fig.11, se sigue la metodología de Barton & Bandis (1990), considerándose el efecto de escala y calculándose en forma cuantitativa el valor de la rugosidad JRC, para lo cual se mide la profundidad de la aspereza de la discontinuidad, en función de la longitud de la discontinuidad (Fig.12). En la Fig.13 se muestra el diagrama de cálculo de JRC en función de la amplitud de la aspereza y la longitud del perfil medido.

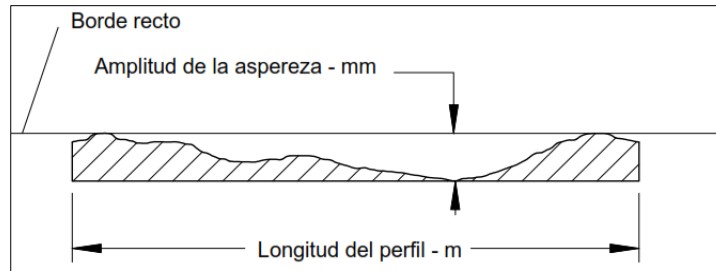


Figura 12. Medida de amplitud y longitud de la aspereza de la junta

Fuente: Barton & Bandis, 1990

Elaborado: por la autora

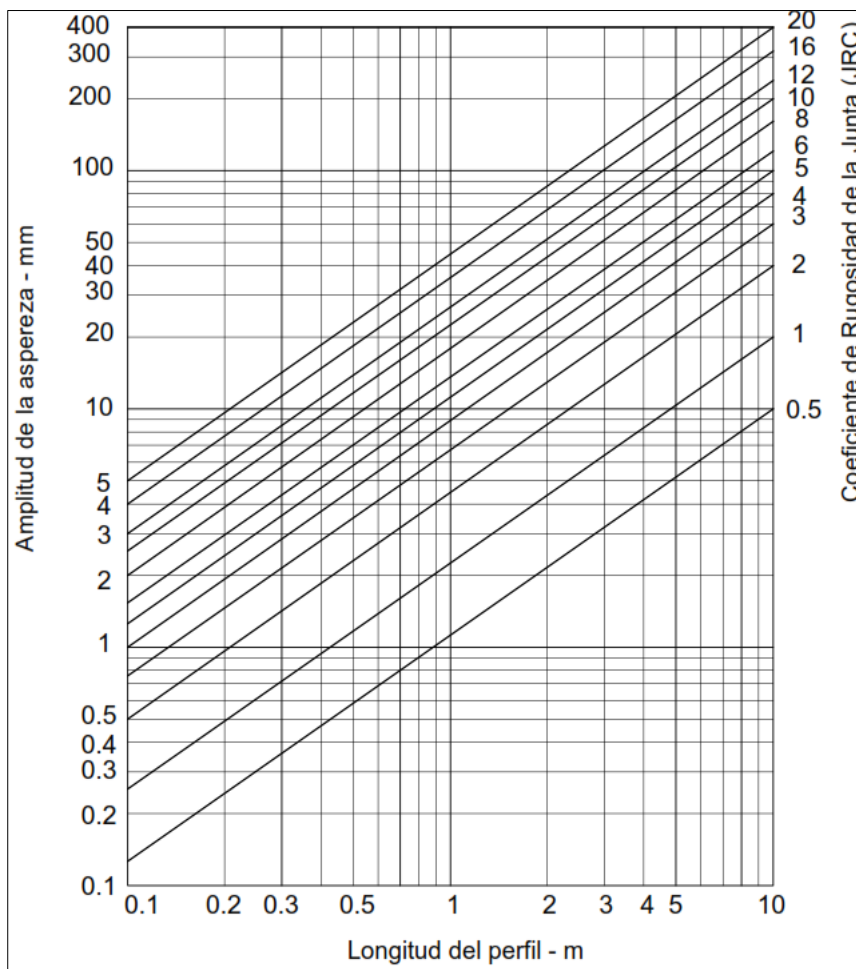


Figura 13. Gráfico para determinar el JRC en función de la amplitud y longitud de la discontinuidad

Fuente: Barton & Bandis, 1990

Elaborado: por la autora

Con los cálculos obtenidos de la sumatoria de los 5 parámetros la relación entre el RMR básico y la calidad de la roca están designados en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores RMR básico

CLASE	CALIDAD DE ROCA	RMR
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Media	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy Mala	0-20

Fuente: Bieniawski, 1979

Elaborado: por la autora

2.1.3.3. SMR (Slope Mass Rating)

El SMR fue propuesto por Romana en 1985, se desarrolló como una secuela del sistema RMR de Bieniawski (1989), ya que este era casi imposible de usar en pendientes debido al rango extremo de los factores de corrección (hasta 60 puntos de un máximo de 100).

El Índice SMR se obtiene del índice RMR básico sumando un "factor de ajuste" que está dado en función de la orientación de las juntas (producto de tres subfactores) y un "factor de excavación" (M. Romana, 2015).

$$SMR = RMR + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$$

Donde:

- RMR básico de la clasificación de macizo rocoso de Bieniawski (Tabla 7)
- Factor de ajuste de las juntas (Tabla 11)
 - F₁: Factor de ajuste que depende del ángulo entre la dirección de buzamiento del talud y de la discontinuidad.
 - F₂: Factor de ajuste que depende del buzamiento de la junta
 - F₃: refleja la relación entre el ángulo de buzamiento de la junta y el talud
- Factor de ajuste según el método de excavación (Tabla 12)
 - F₄: Factor de excavación que es establecido empíricamente

Tabla 11. Factores de ajuste para las discontinuidades.

TIPO DE ROTURA			MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
P	A=	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180$					
P/T	F ₁		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	B=	β_j	<20°	20-30°	30-45°	35-45°	>45°
P			0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F ₂		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P	C=	$\beta_j - \beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(0°)	<(-10°)
T		$\beta_j + \beta_s$	<110°	110-120°	>120°	-	-
P/T	F ₃		0	-6	-25	-50	-60

ROTURA: P planar; T vuelco. DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO: α_j discontinuidad; α_s talud. BUZAMIENTO: β_j discontinuidad; β_s talud

Fuente: Romana, 1985

Elaborado: por el autor

Tabla 12. Factores de ajuste según el método de excavación

METODO	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA O MECANICO	VOLADURA DEFICIENTE
F4	+15	+10	+8	0	-8

Fuente: Romana, 1985

Elaborado: por la autora

(Tomas, Delgado, Cano, & Cuenca, 2007) propusieron funciones continuas para determinar un valor más propicio a los factores de ajuste F1, F2 y F3 (Tabla 13); reduciendo la interpretación subjetiva.

Tabla 13. Funciones continuas para F1, F2 y F3. A: paralelismo entre la discontinuidad y dirección de la superficie del talud; B: buzamiento de la discontinuidad; C: Relación entre el buzamiento de la discontinuidad y el talud.

Parámetro	Planar /Cuña	Vuelco
F ₁	$F_1 = \frac{16}{25} - \frac{3}{500} \tan^{-1} \left(\frac{1}{10} (A - 17) \right)$	
F ₂	$F_2 = \frac{9}{16} + \frac{1}{195} \tan^{-1} \left(\frac{17}{100} B - 5 \right)$	$F_2 = 1$
F ₃	$F_3 = -30 + \frac{1}{3} \tan^{-1} C$	$F_3 = -13 - \frac{1}{7} \tan^{-1} (C - 120)$

Fuente: Tomás et al. 2007

Elaborado: por la autora

La Tabla 14 muestra la clasificación del SMR y las diferentes clases de estabilidad, calidad y los valores límite encontrados en relación al mismo.

Tabla 14. Clasificación SMR

CLASE N °	V	IV	III	II	I
SMR	0 -20	21 -40	41 - 60	61 – 80	81 – 100
Calidad	Muy Mala	Mala	Norma	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cunas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamientos	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Fuente: Romana, 1985
 Elaborado: por la autora

2.1.3.4. Q (Rock Mass Quality)

(Barton, Lien, & Luden, 1974) desarrollaron la clasificación Q, la cual permite estimar parámetros geotécnicos del macizo para el diseño de sostenimiento de túneles y galerías subterráneas . Según (Gonzalez de Vallejo, 2004), puede decirse que el índice Q está definido en función de tres parámetros:

$\frac{RQD}{J_n}$	el tamaño de los bloques
$\frac{J_r}{J_a}$	resistencia al corte entre los bloques
$\frac{J_w}{SRF}$	la influencia del estado tensional

El factor de estabilidad o índice Q, para su cálculo toma en cuenta seis parámetros:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

- RQD: índice de calidad de la roca (Tabla 6)
- J_n : número de familias (Tabla 15)
- J_r : coeficiente de rugosidad de la junta (Tabla 15)
- J_a : coeficiente de las condiciones del relleno de las discontinuidades y características del mismo (Tabla 15)
- J_w : coeficiente de presencia de aguas (Tabla 16)

- SRF: Índice de debilitamiento del macizo por la presencia de las discontinuidades (Tabla 16)

Tabla 15. Valores de los parámetros característicos del índice Q

J_N NÚMERO DE FAMILIAS	VALOR
Roca Masiva	0,5 – 1
Una Familia de juntas	2
Id. con otras juntas ocasionales	3
Dos familias de juntas	4
Id. Con otras juntas ocasionales	6
Tres familias de juntas	9
Id. Con otras juntas ocasionales	12
Cuatro o más familias, roca muy fracturada	15
Roca triturada	20
J_R COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE LA JUNTA	
Juntas (Contacto entre dos caras)	4
Discontinuidades	3
Onduladas, rugosas	2
Onduladas lisas	1,5
Onduladas perfectamente lisas	1,5
Planas, rugosas o irregulares	1
Planas, lisas	0,5
Planas y perfectamente lisas	
Juntas rellenas (relleno impide contacto entre dos caras)	
Material arcilloso	1
Material arenoso, de grava triturado	1
J_a COEFICIENTE DE ALTERACIÓN DE LA JUNTA	
Juntas (sin minerales de relleno intermedio)	0,75 – 1
Juntas de paredes sanas	2
Ligera alteración	4
Alteración arcillosa	
Juntas (Minerales de relleno en pequeño espesor)	
Con partículas arenosas, roca desintegrada	4
Fuertemente sobreconsolidadas con rellenos de minerales arcillosos no blandos	6
Con minerales arcillosos blandos	8
Con minerales arcillosos expansivos	8 – 12
Juntas (minerales de relleno de gran espesor)	
Con roca triturada desintegrada y arcilla	6 – 12
Con zonas de arcilla, limosa, arenosa	5
Con zonas de arcilla (Espesor grueso)	10 – 20

Fuente: Barton, 2000

Elaborado: por la autora

Tabla 16. Valores de los parámetros característicos del índice Q

J_w COEFICIENTE REDUCTOR POR LA PRESENCIA DE AGUA	VALOR
Excavaciones secas o con <5 l/min localmente	1
Afluencia media con lavado de algunas juntas	0,66
Afluencia importante por juntas limpias	0,5
Id. Con lavado de juntas	0,33
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo	0,2 - 0,1
Id. Mantenido	0,1 - 0,05
SRF	VALOR
Zonas débiles intersecan a la excavación	
Multitud de zonas débiles	10
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta (cobertura <50m)	5
Id con cobertura >50m	2,5
Abundantes zonas débiles en roca competente	7,5
Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura <50m)	5
Roca competente (Problemas tensionales en la roca)	
Pequeña cobertura	2,5
Cobertura media	1
Gran cobertura	0,5-2
Rocas deformables (Flujo plástico de la roca)	
Con bajas presiones	5- 10
Con altas presiones	10-20
Rocas expansivas	
Con presión de hinchamiento moderada	5 - 10
Con presión de hinchamiento alta	10 - 15

Fuente: Barton, 2000

Elaborado: por la autora

El índice Q varía entre 0.001 y 1.000 permitiendo determinar la calidad del macizo rocoso (Tabla 17)

Tabla 17. Valoración del macizo rocoso según el Q de Barton.

Q (ROCK MASS QUALITY)	CALIDAD
0,001 - 0,01	Excepcionalmente mala
0,01 - 0,1	Extremadamente mala
1,0 - 4	Muy mala
4 - 10	Mala
10 - 40	Regular
40 - 100	Buena
100 - 400	Extremadamente buena
400 - 1000	Excepcionalmente buena

Fuente: Barton, 1974

Elaborado: por la autora

2.1.3.5. GSI (Índice de Resistencia Geológica)

El GSI fue propuesto por Hoek & Brown en 1995, el cual evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades (Tabla 18).

Es posible establecer una relación del GSI con el caso del RMR de Bieniawski 1989, cuando $RMR_{89} > 25$, donde RMR_{89} asigna 15 puntos a la condición de aguas subterráneas y 0 puntos al ajuste por orientación de las discontinuidades (E.Hoek & Brown, 2007).

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

Tabla 18. Estimación del índice GSI en base a descripciones geológicas in situ.

INDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI	CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas y de cajas frescas sin alterar	BUENA (B) Superficies Rugosas ligeramente alteradas, con presencia de oxidación	MEDIA (M) Superficies lisas y moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
<p>BLOQUES REGULARES (BR)</p> <p>Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.</p>	80	70			
<p>BLOQUES IRREGULARES (BI)</p> <p>Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con relleno con baja proporción de fino.</p>		60	50		
<p>BLOQUES Y CAPAS (BC)</p> <p>Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que formen bloques angulosos y con baja proporción de finos</p>			40	30	20
<p>FRACTURACIÓN INTENSA (FI)</p> <p>Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.</p>					10

Fuente: Hoek y Brown 1997

Elaborado: por la autora

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y MATERIALES

Para el presente trabajo de investigación “CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO, PARA SU APLICACIÓN EN GEOTÉCNIA, EN EL SECTOR LUCARQUI (LOJA-ECUADOR)”, se tomó el macizo rocoso más representativo dentro de la vía Catacocha-El Empalme, este tramo corresponde a 1.33 km de longitud aproximadamente. Para su estudio se ha considerado 3 fases de trabajo: gabinete, campo y laboratorio, las cuales se describen a continuación:

3.1. Trabajo en gabinete

1. Recopilación de mapas geológicos y levantamientos topográficos de la zona de estudio.
2. Elaboración de fichas de campo:
 - Fichas para Zonificación Lito-estructural (Fig.15).
 - Fichas para Caracterización del macizo rocoso (Fig.16).
3. Organización de material y equipo de campo.

3.2. Trabajo de Campo

3.2.1. Identificación del Macizo

Se realizó un recorrido por el sector para reconocimiento del tramo de estudio correspondiente a 1.33 km (Fig.14), a lo largo del cual se identificó visualmente 8 zonas de estudio en base a la litología y discontinuidades presentes, las cuales tienen características similares en cuanto al tipo de roca y grado de fracturamiento.



Figura 14. Campaña de recorrido del tramo de 1.33 km para identificación de las zonas litológicas de estudio.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

3.2.2. Levantamiento geológico

1. Identificación de las 8 zonas litológicas.
2. Descripción de las formaciones litológicas.
3. Identificación de estructuras presentes y resistencia de la matriz rocosa.
4. Determinación de grado de meteorización de la matriz rocosa.
5. Determinación de las condiciones hidrogeológicas.

El Anexo 1 muestra la zonificación mediante los datos obtenidos del levantamiento geológico.

3.2.3. Obtención de datos geomecánicos

1. Se define una línea de escaneo correspondiente a 10 m para la toma de datos a lo largo del tramo de 1.33 km.
2. Toma de datos geomecánicas en las 8 zonas litológicas definidas.
3. Selección de estaciones para obtención de testigos en base a la resistencia y grado de fracturamiento del macizo.

La metodología utilizada en campo permitió recolectar de forma sistemática la información mediante el uso de fichas de zonificación (base para el análisis geológico) y de caracterización del macizo rocoso (base para la obtención de datos geomecánicos), estas fichas fueron tomadas de González de Vallejo et al. (2004) y modificadas por la autora para la recolección de toda la información necesaria para el presente trabajo, las fichas usadas se pueden ver en la Fig.15 y Fig.16

La toma y relleno de datos geomecánicos, se realiza mediante una campaña de 15 días, donde se identifica el número de familias de diaclasas presentes en el macizo y se caracteriza a detalle cada una de las 8 zonas litológicas, mediante recolección continua a través de la línea de escaneo (colocada cada 10 m) se obtiene medidas de: separación, longitud (rumbo, buzamiento), abertura, rugosidad, meteorización, infiltración y relleno de las discontinuidades, además de los datos estructurales (Fig.17).

El relleno en campo de los datos geomecánicos se lo ejecuta según se lo explica en la ficha del Anexo 2. En gabinete los datos levantados se ordenan y digitalizan por zonas, posteriormente son promediados en función de las familias de diaclasas (Anexo 3), con el fin de caracterizar la calidad del macizo rocoso por medio de las diferentes clasificaciones que se detallaran más adelante.

PROYECTO: _____		ESTACIÓN: _____		HOJA/PLANO: _____					
REALIZADO POR: _____		LOCALIZACIÓN: _____		FOTO: _____					
FECHA: _____									
LITOLOGÍA	NATURALEZA:			POTENCIA:	FORMACIÓN Y EDAD:				
FORMACIONES SUPERFICIALES	NATURALEZA Y TEXTURA:			MORFOLOGÍA:	ESPEJOR:				
ESTRUCTURA	PLIEGUES		FALLAS		OTROS:				
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m3	Muy Grandes <1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy Pequeños >30	Muy brechificado >60		
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadam blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blandas (Punta de martillo) 2	Media (1 golpe martillo) 3	Dura (+ 1 golpe martillo) 4	Muy dura (<u>Varios golpes</u>) 5	Extremadam Dura (Sólo raya con martillo) 6		
GRADOS DE METEORIZACION	I Inalterada (6)		II Ligeramente alterada (5)		III Moderadamente altarada (3)		IV Muy alterada (1)	V Compl meteorizada (0)	VI Suelo residual (0)
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua		Seco (<u>sin señales de agua</u>)		Húmedo		Goteos	Flujo	CAUDAL ESTIMADO:
MUESTRAS									OBSERVACIONES:
CROQUIS N° 1					OBSERVACIONES				

Figura 15. Ficha de Zonificación
Fuente: González de Vallejo et al. (2004)
Elaborado: por la autora



Figura 17. Campaña de toma de datos geomecánicos, a) Colocación de línea de escaneo, b) medida de separación, c) y d) medida de longitud (rumbo-buzamiento), e) medida de aberturas, f) y g) ejecución de ensayo de esclerometría de bajo impacto, h) medida de rugosidad peine de barton

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Como parte de la etapa de campo se realizó la campaña de testificación obteniendo 1 muestra de roca de 12-15 cm correspondiente a cada zona litológica por medio de un muestreador de núcleos con corona de diamante de 2.5" de diámetro exterior, las muestras fueron codificadas en su orden para su posterior análisis en laboratorios (Fig.18).



Figura 18. Campaña de testificación, a) ejecución de la labor de perforación, b) recuperación de testigo de perforación, c) personal de campo junto al total de muestras extraídas.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

3.3. Análisis de laboratorio

En esta etapa se procede a realizar los ensayos en laboratorio, análisis mineralógico y químico de la matriz rocosa. Con los núcleos de roca obtenidos en campo se realizaron ensayos de: densidad, resistencia a la compresión simple, valor de rebote al martillo Schmidt de bajo impacto, ángulo de fricción básico mediante ensayo Till test. Previo a realizar los ensayos las muestras fueron preparadas siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Corte. _ se realiza el corte del testigo obteniendo una muestra de 10 cm de longitud.
2. Pulido de los testigos. _ con la ayuda de lijas se pule los testigos para eliminar las asperezas y rugosidades en las muestras.
3. Recodificación. _ se codifica las muestras nuevamente ya que al realizar el pulido la información establecida en campo fue eliminada.



Figura 19. Corte, pulido y recodificación de testigos.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

3.3.1. Ensayo de compresión simple.

La ejecución del ensayo de compresión simple (Fig.20) sigue la normativa ASTM D3938, con rotura de testigos de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura, previamente a la realización del mismo se realiza el ensayo de densidad de las muestras (Castillo, 2017)



Figura 20. Ensayo de resistencia a la compresión simple.
 Fuente: la autora
 Elaborado: por la autora

La metodología para el cálculo de la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa utiliza como equipo la prensa hidráulica de 200 toneladas marca Maquisuelos, el parámetro que se obtiene es la compresión simple de las juntas o discontinuidad (JCS).

3.3.2. Rebote al martillo de bajo impacto.

En el caso de las discontinuidades en el macizo rocoso, se utiliza métodos como el índice de rebote (R) del martillo de Schmidt de bajo impacto o tipo L, el índice de rebote debe ser corregido por orientación del martillo de acuerdo a la Tabla 19.

La Fig.21, muestra la correlación entre el índice de rebote del martillo de Schmidt y la resistencia a la compresión simple de la roca, en función de su densidad (Deere & Miller, 1966), esta correlación sigue la expresión:

$$\log_{10} \sigma_{cs} = 0.00088\gamma R + 1.01$$

Donde:

- σ_{cs} esfuerzo a la compresión simple de las paredes de la discontinuidad (MN/m²)
- γ densidad seca de la roca (KN/m³)
- R índice de rebote en posición vertical

Tabla 19. Corrección para reducción de la medida del índice de rebote del martillo de Schmidt cuando el martillo no se encuentra en la posición vertical

Rebote R	Hacia abajo		Hacia arriba		Horizontal $\alpha = 0^\circ$
	$\alpha = -90^\circ$	$\alpha = -45^\circ$	$\alpha = +90^\circ$	$\alpha = +45^\circ$	
10	0	-0.8	-	-	-3.2
20	0	-0.9	-8.8	-6.9	-3.4
30	0	-0.8	-7.8	-6.2	-3.1
40	0	-0.7	-6.6	-5.3	-2.7
50	0	-0.6	-5.3	-4.3	-2.2
60	0	-0.4	-4.0	-3.3	-1.7

Fuente: Deere & Miller, 1966

Elaborado: por la autora

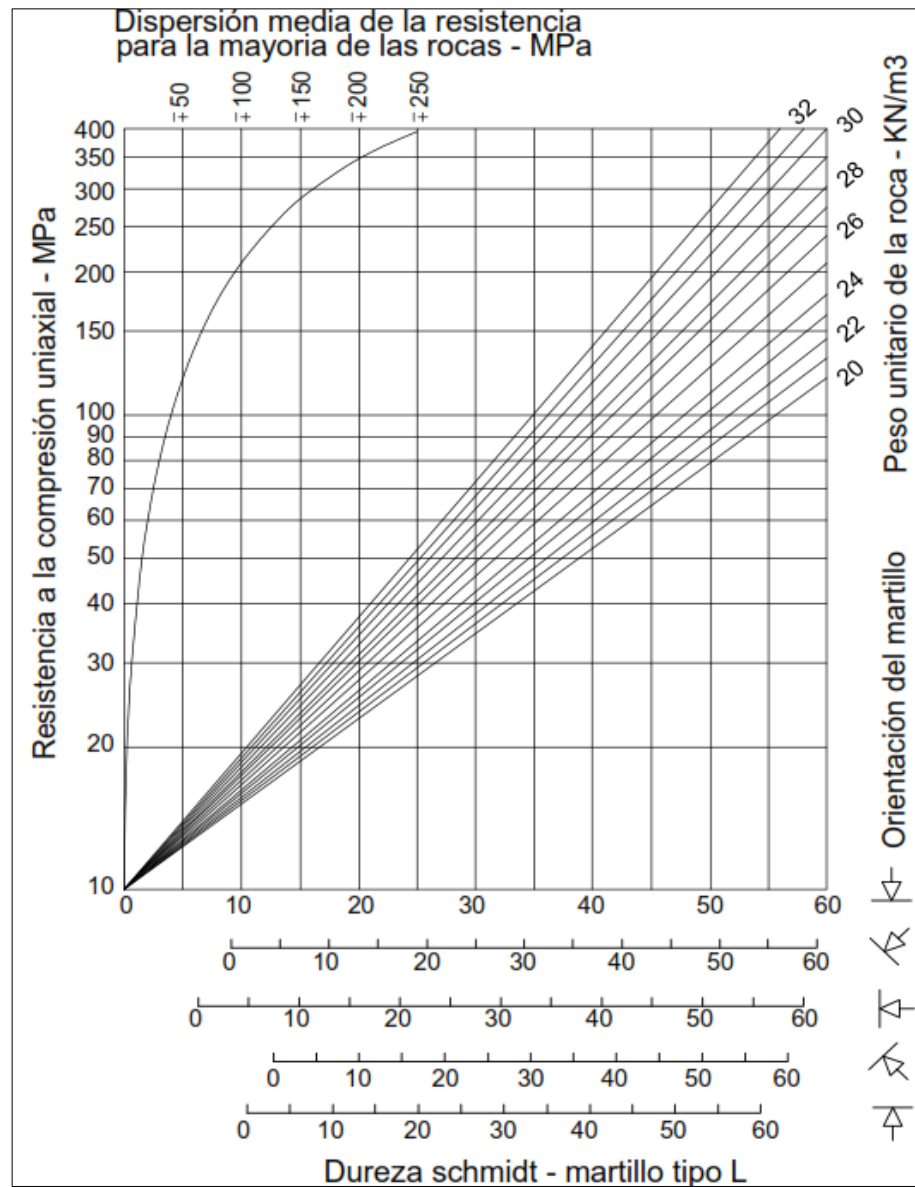


Figura 21. Valores típicos de resistencia para la mayoría de las rocas, en función del índice de rebote y su densidad.

Fuente: Deere & Miller, 1966

Elaborado por: la autora

Se utiliza los símbolos “R” cuando el índice de rebote se ha obtenido sobre una roca inalterada y “r” cuando se ha obtenido sobre las paredes de una discontinuidad, el valor r se utiliza para el cálculo de la resistencia a la compresión simple de las paredes de las discontinuidades JCS.

En función de la relación entre el índice de rebote de la roca inalterada con respecto a la roca alterada, se puede encontrar también el valor del ángulo de fricción residual de la roca con base en su ángulo de fricción básico, la metodología utiliza la siguiente expresión (Barton & Choubey, 1997)

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R}$$

Donde:

- ϕ_b _ ángulo de fricción básico estimado por el ensayo de Tilt Test sobre una superficie seca inalterada o por tablas.
- R_ Rebote del martillo de Schmidt sobre una superficie seca inalterada
- r_ Rebote del martillo de Schmidt sobre la superficie alterada o húmeda.

En la Fig.22 se muestra la ejecución del ensayo de medición del valor de rebote R.



Figura 22. Ejecución y medición del valor de rebote R con martillo Schmidt de bajo impacto.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

3.3.3. Ensayo Tilt Test

El ensayo Tilt Test es el idóneo para el cálculo del ángulo de fricción básico de la roca, aplicando la metodología recomendada por Stimpson (1981), quien ha definido la siguiente expresión para encontrar el ángulo de fricción básico utilizando tres testigos o núcleos de roca (Fig.23).

$$\phi b = \tan^{-1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \tan \alpha \right)$$

Donde:

- ϕb _ ángulo de fricción básico estimado por el ensayo de Tilt Test sobre una superficie seca inalterada.
- α _ ángulo medido en ensayo Tilt Test

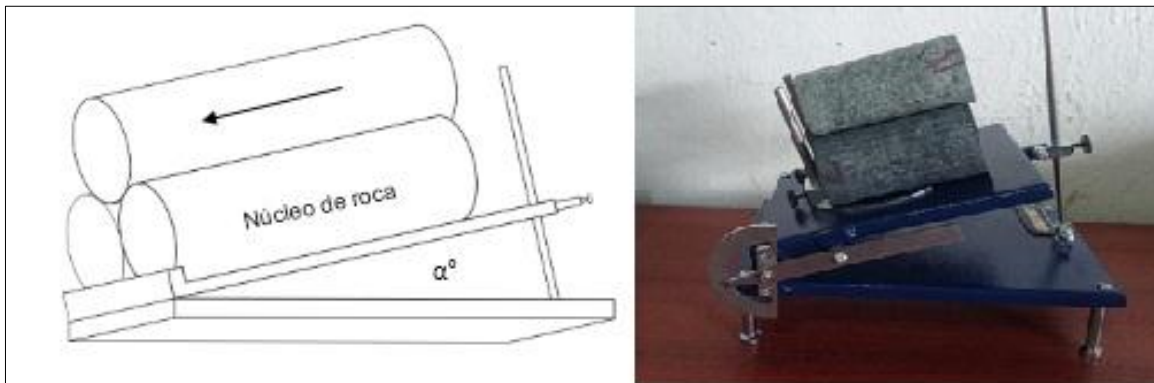


Figura 23. Esquema y ejecución del ensayo Tilt Test en núcleos de roca.

Fuentes: Stimpson (1981)

Elaborado: por la autora

3.3.4. Análisis Mineralógico

Para determinar el tipo de roca de las diferentes zonas litológicas, se realizó un análisis macroscópico petrográfico, previo a realizar los análisis se prepararon las muestras mediante el siguiente procedimiento:

1. Corte de núcleos para obtención de una muestra o sección delgada de aproximadamente 1.5 cm utilizando la maquina cortadora LAPRO BLAB SAB 48 (Fig.24).
2. Pulido de muestras, pasando por lija 120, 280, 400 (Fig.24)



Figura 24. Campaña de laboratorio, a la izquierda maquina cortadora de roca LAPRO 48; a la derecha núcleos y secciones delgadas correspondientes zonas litológicas.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Una vez obtenida las muestras y con la ayuda del microscopio óptico y la cámara ocular Dino-Eye (microscopia digital) se procede a realizar el análisis mineralógico que permite determinar el tipo de roca presente en cada una de las zonas litológicas (Fig.25).

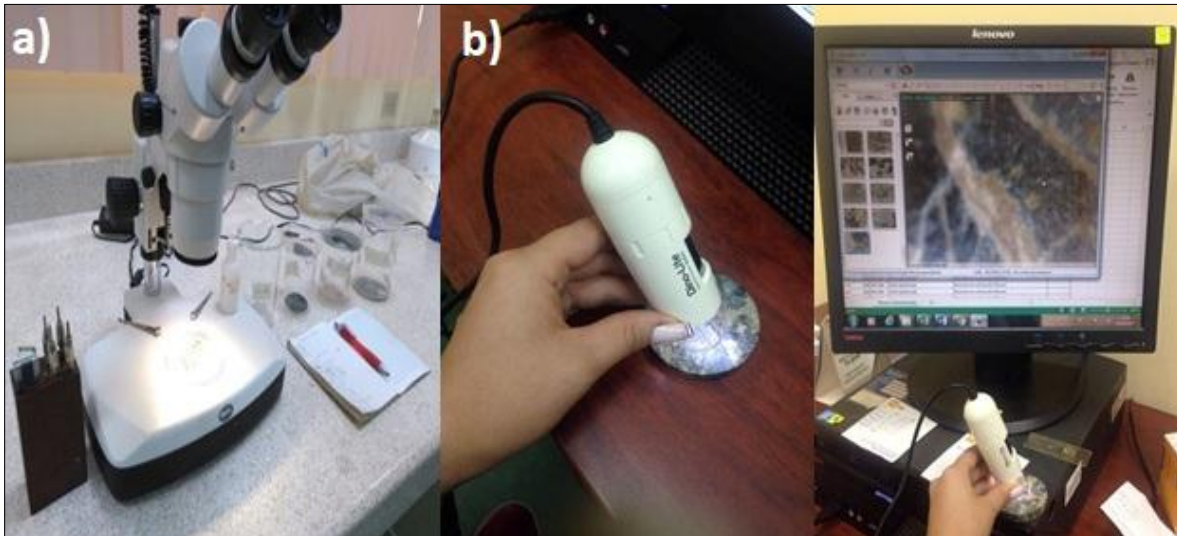


Figura 25. Campaña de laboratorio; a) análisis mineralógico mediante microscopia óptica; b) análisis mineralógico mediante cámara ocular.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Una vez realizado el análisis mineralógico se procede a determinar y describir el tipo de roca en base a los criterios de clasificación para rocas ígneas y clasificación de rocas piroclásticas en función del tamaño de los clastos.

3.3.5. Análisis químico

Se procede a realizar análisis químico por fluorescencia de rayos X (Fig.26) con el fin de determinar los elementos presentes en una de las muestras correspondiente a la zona litológica #7 y de esta manera determinar los minerales presentes en la roca.



Figura 26. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Se utiliza la clasificación TAS (Total Alkali Silica), una metodología que permite relacionar el contenido de minerales alcalinos (Na_2O y K_2O) y el contenido de silicatos (SiO_2), estos parámetros químicos son útiles porque la cantidad relativa de minerales alcalinos y silicatos juega un papel determinante para determinar la mineralogía real de la roca (Fig.27).

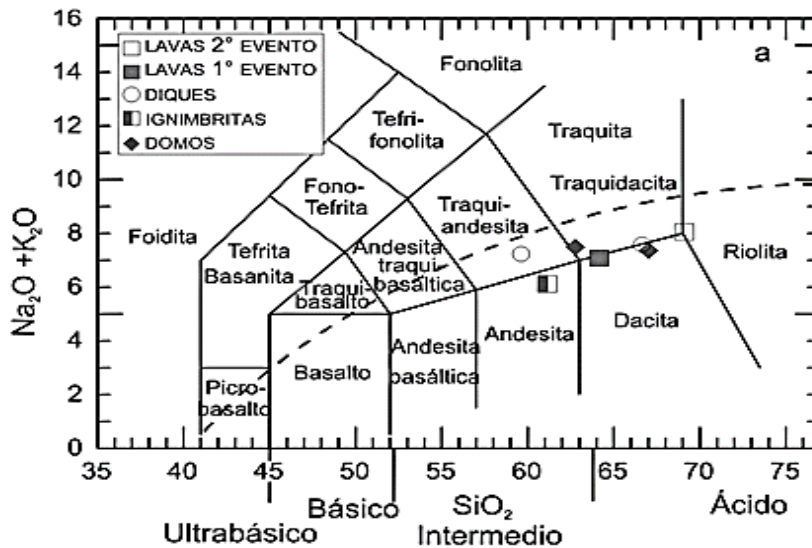


Figura 27. Clasificación Tas (Total Alkali Silica).

Fuente: Le Maitre, 1984

Elaborado: por la autora

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Caracterización geológica del sector

La geología de la zona de estudio está representada por la Formación Celica de edad cretácica (Albiense), perteneciente a la secuencia oriental de la Cuenca Alamor Lancones. La formación está compuesta principalmente por la presencia de rocas ígneas volcánicas; andesitas de tonalidad verde caracterizadas por la presencia de pirolusitas, andesitas de tonalidad gris parduzco y tobas andesíticas de lapilli, las cuales se observan a lo largo de las ocho zonas litológicas del tramo de estudio (Fig.28).

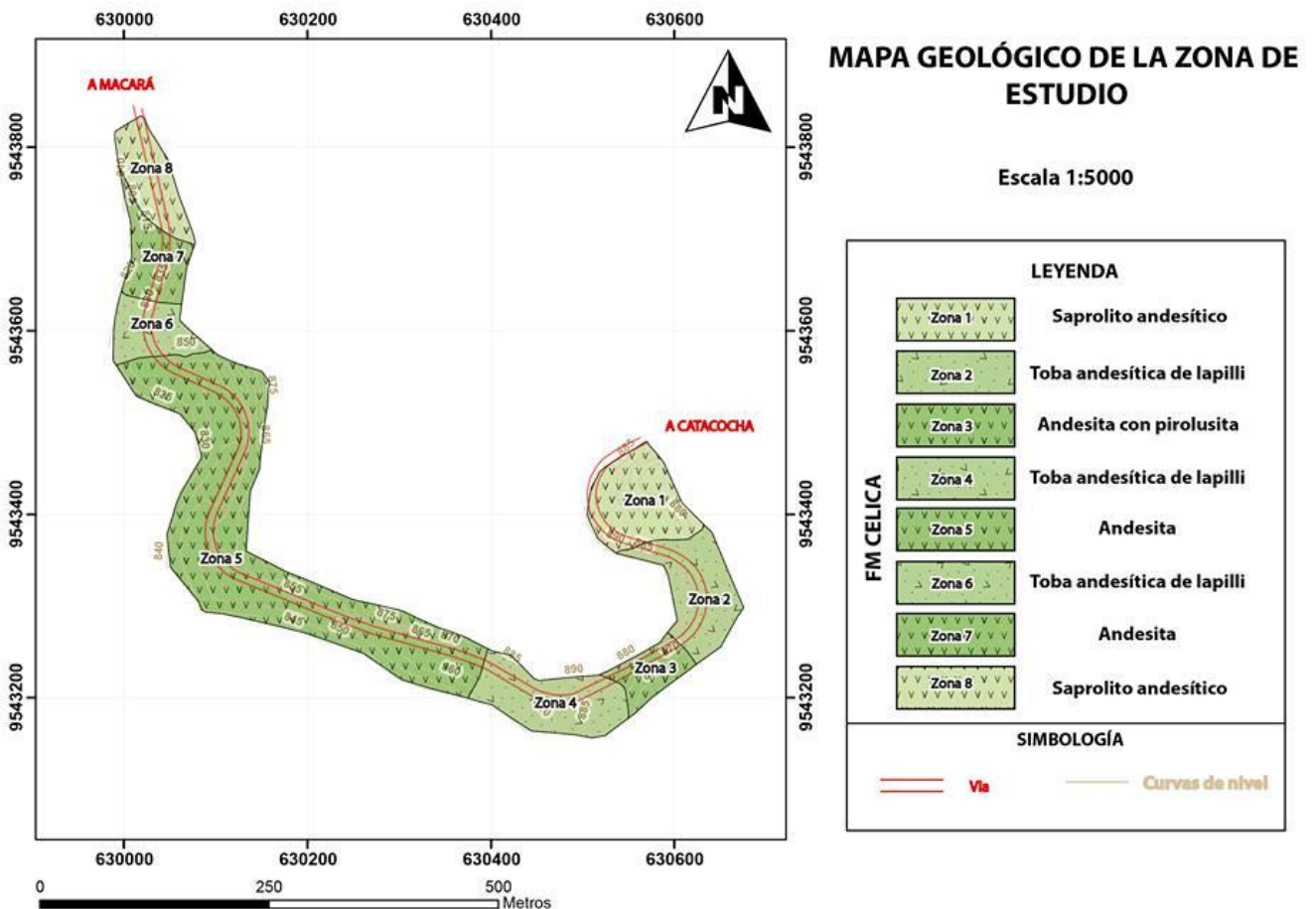


Figura 28. Mapa litológico de la zona de estudio

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Las andesitas de tonalidad grisácea de composición básica y textura afanítica, poseen gran cantidad de sílice (SiO_2) en un 60% aproximadamente, porcentaje que fue obtenido al realizar el análisis químico de fluorescencia de rayos X, lo que explica que la roca al fracturarse presente mayor angulosidad, por otro lado, las rocas piroclásticas de composición básica a intermedia y textura fanerítica presentan clastos irregulares de 30 mm a 2 mm; clasificadas en función del tamaño de clastos como una toba de lapilli y en base a su mineralización como una toba andesítica de lapilli.

Las rocas presentan una alteración epidotica y clorítica en menor grado; además, baja cantidad de carbonatos y oxidaciones, algunas de estas rocas se caracterizan por la presencia de xenolitos de toba de lapilli en forma angulosos y subangulosos (Fig.29).



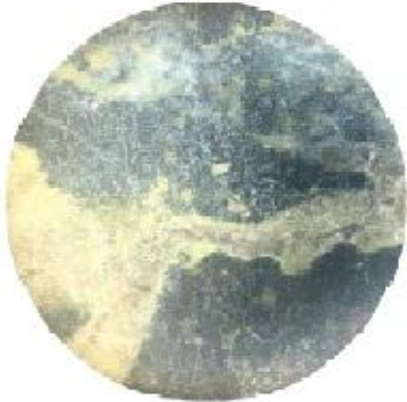
Figura 29. De izquierda a derecha tenemos; a) roca andesítica con mineralización de pirolusita, b) roca andesítica de composición básica, c) toba andesítica de lapilli, d) andesita con presencia de xenolitos de toba de lapilli

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Realizando un análisis macroscópico petrográfico se observa en las rocas minerales como: plagioclasas, minerales máficos (piroxenos), hornblenda, cuarzo, epidota y hematita (Fig.30).

Muestra P-017-97 (1)



Muestra P-017-97 (2)



Figura 30. Análisis mineralógico de muestras mediante microscopio.
Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

4.2. Parámetros físico-mecánicos del macizo rocoso

La toma de datos geomecánicos se la realiza a lo largo de los 1.33 km de longitud comprendida entre las abscisas 27+530 a 28+860 del marcado vial, no se caracterizó el tramo de la abs 27+530 a 27+550 correspondiente a la zona 1 y las abs 28+760 a 28+860 correspondientes a la zona 8, las cuales corresponde a un saprolito andesítico, que posee una fuerte meteorización y un alto diaclasamiento.

De la fase de análisis geológico se realizó la zonificación litológica de la zona de estudio correspondiente a 1.33 km (Fig.31), esta zonificación da como resultados 8 zonas a ser analizadas (Tabla 20).

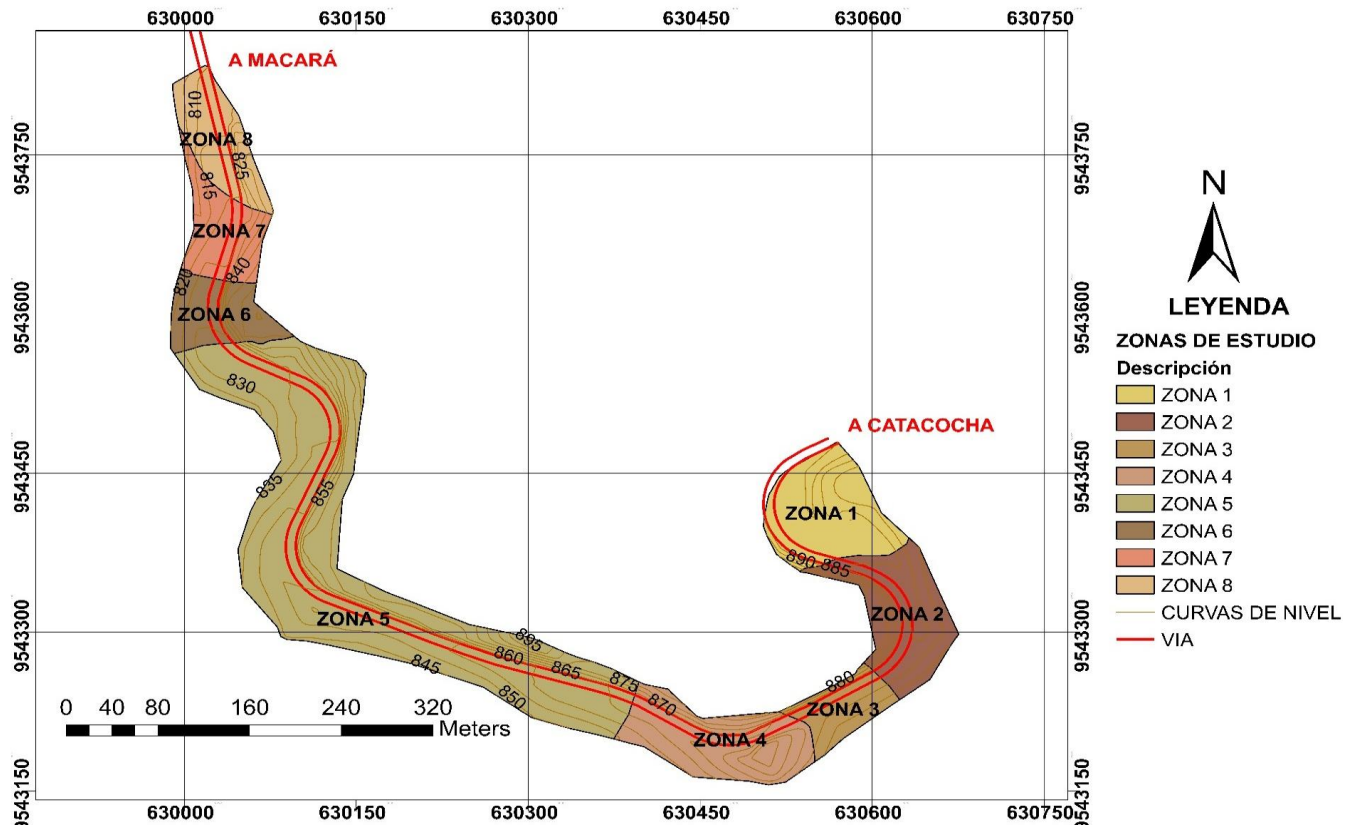


Figura 31. Mapa de Zonificación del tramo de estudio Abs: 27+530 a 28+860.

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Tabla 20. Zonas litológicas del tramo de estudio

ZONA #	ABSISA	CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS
1	27+530 A 27+550	Saprolito Andesítico
2	27+550 A 27+740	Toba Andesítica de Lapilli muy fracturada
3	27+740 A 27+820	Andesita con mineralización de pirolusita
4	27+820 A 28+050	Intercalaciones de Toba Andesítica de Lapilli y Andesita muy fracturada
5	28+050 A 28+600	Andesita muy fracturada
6	28+600 A 28+670	Toba Andesítica de Lapilli
7	28+670 A 28+760	Andesita muy fracturada
8	28+760 A 28+860	Saprolito Andesítico

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Los datos geomecánicos se levantarán por medio de las fichas mencionadas anteriormente, el Anexo 2 muestra un ejemplo del relleno de las mismas y en el Anexo 3 se observa como ejemplo la caracterización geomecánica de la Zona 1 correspondiente a la estación 27+530 a

27+550, en la cual se han identificado 4 familias de discontinuidades, de las cuales se han obtenido los parámetros geomecánicos basados en las medidas de: separación, longitud (rumbo, buzamiento), abertura, rugosidad, meteorización, infiltración y relleno de las discontinuidades, además de los datos estructurales, siendo la rugosidad medida en términos de JRC en función de la amplitud de la aspereza y la longitud del perfil medido, y la resistencia a la compresión simple de las paredes de las discontinuidades por medio del esclerómetro de bajo impacto o tipo L.

Para completar la caracterización geomecánica se realizó una testificación de la matriz rocosa en cada una de las zonas litológicas para realizar su respectivo análisis. No se tomaron muestras del tramo de la abs 27+530 a 27+550 correspondiente a la zona 1 y las abs 28+760 a 28+860 correspondientes a la zona 8, puesto corresponde a un saprolito andesítico, que posee una fuerte meteorización y un alto diaclasamiento, a estas zonas se les asume los valores de la zona más cercana.

En la Tabla 21, se resumen los resultados de laboratorio, ensayos Tilt test (ángulo de fricción básico ϕb), resistencia al rebote del martillo Schmitt, densidad, y compresión simple de las muestras de la zona 2 a la 7.

Tabla 21. Resumen de datos obtenidos en ensayos de laboratorio.

ZONA	DENSIDAD	ÁNGULO DE FRICCIÓN BÁSICO	R	ESCLEROMETRIA	COMPRESIÓN SIMPLE
	KN/m ³	grados	-	Mpa	Mpa
zona 1	27.54	22	51	161.38	106.84
zona 2	27.54	22	51	161.38	106.84
zona 3	26.95	27	51	192.94	89.97
zona 4	28.23	34	51	192.94	44.91
zona 5	27.60	34	52	190.11	98.28
zona 6	27.86	36	52	189.04	84.24
zona 7	29.03	34	51	199.66	82.77
zona 8	29.03	34	51	199.66	82.77

Fuente: la autora.

Elaborado: por la autora

En la Tabla 22 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos de las 4 familias de discontinuidades de la zona 1 correspondiente a la estación 27+530 a 27+550; densidad γ , “ r ” índice de rebote sobre las paredes de las discontinuidades, “ R ” índice de rebote sobre una roca inalterada, ángulo de fricción básico ϕ_b cálculo del ángulo de fricción residual ϕ_r y JCS.

Tabla 22. Cálculo de ángulo de fricción residual ϕ_r y JCS de la estación 27+530 a 27+550

J	γ (KN/m ³)	r	R	ϕ_b	ϕ_r	JCS
J1	27.5	28	51	22	13	47,61
J2	27.5	26	51	22	12	42,81
J3	27.5	12	51	22	7	19,53
J4	27.5	27	51	22	12	45,35

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

4.3. Clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Con la información recolectada de los datos de cada familia de discontinuidad levantados en campo y ensayos en laboratorio se obtienen los valores para realizar la caracterización según el método RQD, RMR, SMR, Q BARTON, GSI.

4.3.1. RQD

El RQD se lo obtiene realizando el cálculo del índice volumétrico de las discontinuidades por cada m³ conocido como J_v , el cual es el resultado de la sumatorio total de $1/SM_i$ espaciamiento medio de cada discontinuidad en m. En la Tabla 23 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para la obtención del índice RQD correspondiente a la zona 1 abs 27+530 a 27+550.

Tabla 23. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del RQD (Zona 1)

Zona	Abs	Familia	SM _i (mm)	SM _i (m)	1/SM _i (m)	J _v /m ³	RQD (%)	CALIDAD
1	27+530 A 27+550	J1	53	0,053	18,8	57,5	0	Mala
	27+530 A 27+550	J2	50	0,050	20,0			
	27+530 A 27+550	J3	103	0,103	9,7			
	27+530 A 27+550	J4	110	0,110	9			

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Los resultados del tramo de vía estudiado se condensan en la tabla siguiente:

Tabla 24. Resultados del RQD

Zona	Abs	RQD (%)	CALIDAD
1	27+530 A 27+550	0	Muy Mala
2	27+550 A 27+560	62,0	Regular
2	27+560 A 27+570	16,3	Muy Mala
2	27+570 A 27+580	76,9	Buena
2	27+580 A 27+590	66,6	Regular
2	27+590 A 27+600	14,5	Muy Mala
2	27+600 A 27+650	56,7	Regular
2	27+650 A 27+660	No dato	No dato
2	27+660 A 27+670	78,4	Buena
2	27+680 A 27+690	21,9	Muy Mala
2	27+690 A 27+730	36,0	Mala
2	27+730 A 27+740	62,3	Regular
3	27+740 A 27+770	31,8	Mala
3	27+770 A 27+780	50,2	Regular
3	27+780 A 27+790	41,0	Mala
3	27+790 A 27+800	65,8	Regular
3	27+800 a 27+830	32,6	Mala
4	27+830 A 27+850	61,1	Regular
4	27+850 A 27+860	1,4	Muy Mala
4	27+860 A 27+870	64,6	Regular
4	27+870 A 27+880	86,2	Buena
4	27+880 A 27+890	70,6	Regular
4	27+890 A 27+910	13,4	Muy Mala
4	27+910 A 27+920	63,5	Regular
4	27+920 A 27+930	89,6	Buena
4	27+930 A 27+940	69,6	Regular
4	27+940 A 27+950	75,0	Regular
4	27+950 A 27+970	81,1	Buena
4	27+970 A 28+000	99,4	Excelente
4	28+000 A 28+020	22,9	Muy Mala
4	28+020 A 28+030	79,3	Buena
4	28+030 A 28+050	0	Muy Mala
5	28+050 A 28+060	86,2	Buena
5	28+060 A 28+100	95,8	Excelente
5	28+100 A 28+110	88,1	Buena
5	28+110 A 28+150	97,6	Excelente
5	28+150 A 28+160	12,0	Muy Mala
5	28+160 A 28+180	57,4	Regular
5	28+180 A 28+200	42,2	Mala
5	28+200 A 28+210	70,5	Regular
5	28+210 A 28+230	37,4	Mala
5	28+230 A 28+240	65,4	Regular
5	28+240 A 28+250	44,2	Mala
5	28+250 A 28+270	65,6	Regular
5	28+270 A 28+280	38,8	Mala
5	28+280 A 28+290	0	Muy Mala
5	28+290 A 28+300	75,2	Buena
5	28+300 A 28+310	21,0	Muy Mala

Zona	Abs	RQD (%)	CALIDAD
5	28+310 A 28+320	55,8	Regular
5	28+320 A 28+330	37,8	Mala
5	28+330 A 28+370	6,9	Muy Mala
5	28+370 A 28+380	54,2	Regular
5	28+380 A 28+390	50,0	Mala
5	28+390 A 28+400	82,5	Buena
5	28+400 A 28+440	70,6	Regular
5	28+440 A 28+460	36,2	Mala
5	28+460 A 28+470	21,9	Muy Mala
5	28+470 A 28+480	89,3	Buena
5	28+480 A 28+490	62,8	Regular
5	28+490 A 28+500	76,7	Buena
5	28+500 A 28+530	34,7	Mala
5	28+540 A 28+550	64,1	Regular
5	28+550 A 28+560	47,0	Mala
5	28+560 A 28+580	61,9	Regular
5	28+580 A 28+590	0	Muy Mala
5	28+590 A 28+640	64	Regular
6	28+640 A 28+650	76,7	Buena
6	28+650 A 28+660	64,4	Regular
6	28+660 A 28+670	13,8	Muy Mala
6	28+670 A 28+680	54,9	Regular
7	28+680 A 28+700	30,7	Mala
7	28+700 A 28+710	22,6	Muy Mala
7	28+720 A 28+730	30,4	Mala
7	28+730 A 28+740	65,9	Regular
7	28+740 A 28+750	40,0	Mala
7	28+750 A 28+760	69,1	Regular

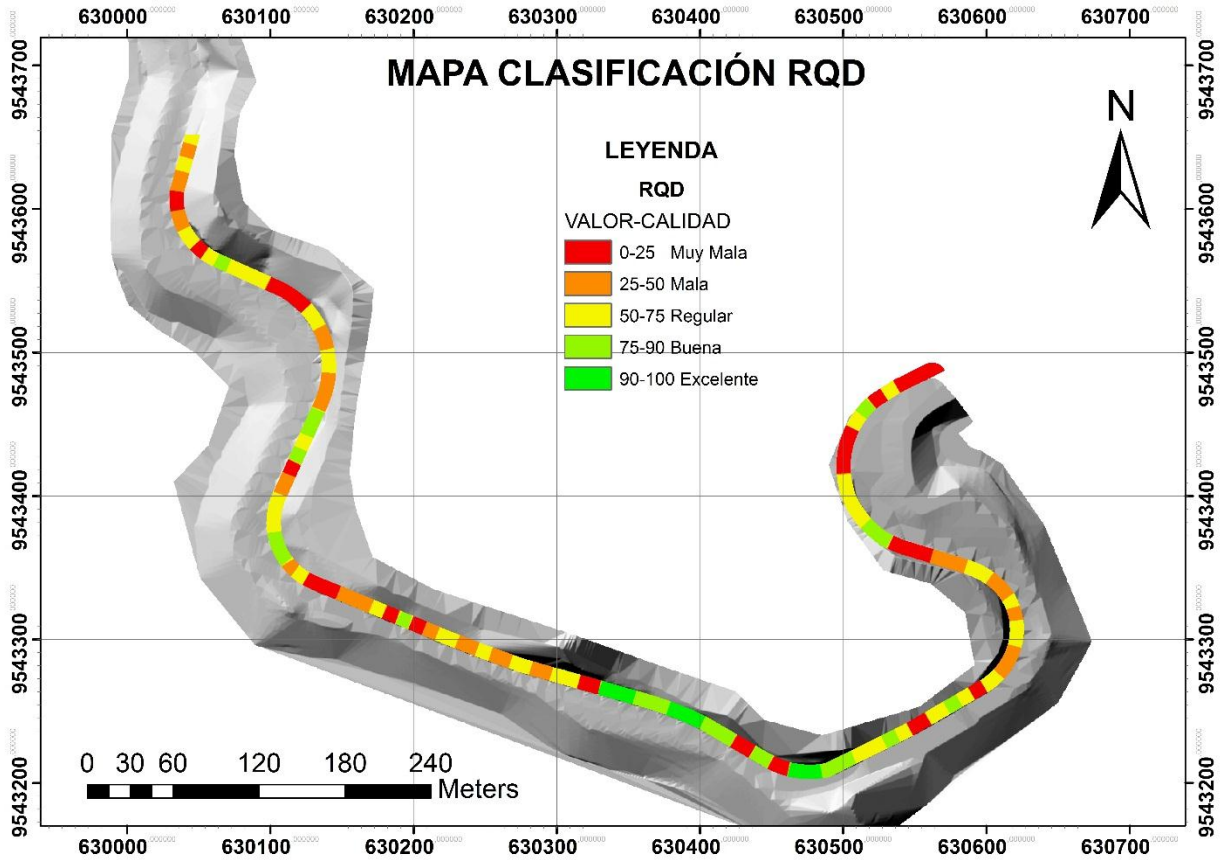


Figura 32. Mapa Clasificación RQD
 Fuente: la autora
 Elaborado por: la autora

4.3.2. RMR

El RMR se lo obtiene a partir de 5 parámetros como son: compresión simple, índice RQD, espaciamiento, longitud abertura, rugosidad (medida en términos JRC), meteorización, filtración y relleno de las discontinuidades, la sumatoria de estos parámetros da como resultado el valor del RMR, el cual permite determinar la clase y la calidad del macizo rocoso. En la Tabla 25 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para la obtención del índice RMR correspondiente a la zona 1 abs 27+530 a 27+550.

Tabla 25. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del RMR (Zona 1)

ZONA	Abs	Flia	σc (Mpa)	RQD (%)	Smi (mm)	LD	Aper	JRC	Rell	Meteo	Fl.Agua	Param. 1	Param.2	Param.3	Parametro 4						Param.5	RMR	CLASE	CALIDAD
															LD	AP	JRC	RELL	MET	ΣP4				
1	27+530 A 27+550	J1	107	0	53	0,45	3,00	8,5	6	2	9	9,88	2,83	3,14	5,02	1,87	2,21	6	2	16,77	9	41,62	IV	Media
1	27+530 A 27+550	J2	107		50	0,28	3,17	14,5	1	2	9	9,88	2,83	3,12	5,37	1,78	5,15	1	2	14,96	9	39,79	IV	Mala
1	27+530 A 27+550	J3	107		103	0,91	2,33	8,5	1	2	9	9,88	2,83	3,43	4,16	2,21	2,21	1	2	11,25	9	36,40	IV	Mala
1	27+530 A 27+550	J4	107		110	0,29	2,83	7	1	2	9	9,88	2,83	3,47	5,34	1,95	1,48	1	2	11,44	9	36,62	IV	Mala

Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

Los resultados del tramo de vía estudiado se condensan en la tabla siguiente:

Tabla 26. Resultados RMR

ZONA	Abs	RMR	CLASE	CALIDAD
1	27+530 A 27+550	38,61	IV	Mala
2	27+550 A 27+560	61,32	II	Buena
2	27+560 A 27+570	60,51	II	Buena
2	27+580 A 27+590	59,29	III	Media
2	27+590 A 27+600	50,46	III	Media
2	27+600 A 27+610	58,21	III	Media
2	27+610 A 27+620	57,69	II	Media
2	27+620 A 27+630	62,03	II	Buena
2	27+630 A 27+640	52,66	III	Media
2	27+640 A 27+650	59,87	III	Media
2	27+660 A 27+670	55,65	III	Media
2	27+680 A 27+690	45,20	III	Media
2	27+690 A 27+700	53,40	III	Media
2	27+700 A 27+710	56,47	III	Media
2	27+710 A 27+720	55,72	III	Media
2	27+720 A 27+730	51,86	III	Media
2	27+730 A 27+740	56,04	III	Media
3	27+740 A 27+750	50,43	III	Media
3	27+750 A 27+760	45,23	III	Media
3	27+760 A 27+770	48,23	III	Media
3	27+770 A 27+780	51,96	III	Media
3	27+780 A 27+790	48,02	III	Media

ZONA	Abs	RMR	CLASE	CALIDAD
4	27+890 A 27+900	48,46	III	Media
4	27+900 A 27+910	46,26	III	Media
4	27+910 A 27+920	61,38	II	Buena
4	27+920 A 27+930	58,68	III	Media
4	27+930 A 27+940	52,98	III	Media
4	27+940 A 27+950	56,71	III	Media
4	27+950 A 27+960	55,12	III	Media
4	27+960 A 27+970	58,03	III	Media
4	27+970 A 27+980	69,29	II	Buena
4	27+980 A 27+990	66,43	II	Buena
4	27+990 A 28+000	66,77	II	Buena
4	28+000 A 28+010	35,97	IV	Mala
4	28+010 A 28+020	43,29	III	Media
4	28+020 A 28+030	52,03	III	Media
4	28+030 A 28+050	39,20	IV	Mala
5	28+050 A 28+060	68,75	II	Buena
5	28+060 A 28+070	71,91	II	Buena
5	28+070 A 28+080	69,50	II	Buena
5	28+080 A 28+090	73,67	II	Buena
5	28+090 A 28+100	62,65	II	Buena
5	28+100 A 28+110	73,48	II	Buena
5	28+110 A 28+120	69,75	II	Buena

3	27+790 A 27+800	55,53	III	Media
3	27+800 A 27+820	48,34	III	Media
4	27+820 A 27+830	44,66	III	Media
4	27+830 A 27+840	48,61	III	Media
4	27+840 A 27+850	48,10	III	Media
4	27+850 A 27+860	38,97	IV	Mala
4	27+860 A 27+870	55,13	III	Media
4	27+870 A 27+880	59,02	III	Media
4	27+880 A 27+890	56,03	III	Media

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

5	28+120 A 28+130	73,28	II	Buena
5	28+130 A 28+140	80,96	I	Muy buena
5	28+140 A 28+150	67,24	II	Buena
5	28+150 A 28+160	51,32	III	Media
5	28+160 A 28+170	52,94	III	Media
5	28+170 A 28+180	51,46	III	Media
5	28+180 A 28+190	51,85	III	Media
5	28+190 A 28+200	62,05	II	Buena
5	28+200 A 28+210	56,09	III	Media

Tabla 27. Resultados del RMR

ZONA	Abs	RMR	CLASE	CALIDAD
5	28+210 A 28+220	50,97	III	Media
5	28+220 A 28+230	50,10	III	Media
5	28+230 A 28+240	53,70	III	Media
5	28+240 A 28+250	49,64	III	Media
5	28+250 A 28+260	52,45	III	Media
5	28+260 A 28+270	55,05	III	Media
5	28+270 A 28+280	47,29	III	Media
5	28+280 A 28+290	41,65	III	Media
5	28+290 A 28+300	57,12	III	Media
5	28+300 A 28+310	46,93	III	Media
5	28+310 A 28+320	52,61	III	Media
5	28+320 A 28+330	47,10	III	Media
5	28+330 A 28+340	41,90	III	Media
5	28+340 A 28+350	44,49	III	Media
5	28+350 A 28+360	42,78	III	Media
5	28+360 A 28+370	41,44	III	Media
5	28+370 A 28+380	45,78	III	Media
5	28+380 A 28+390	51,64	III	Media
5	28+390 A 28+400	57,03	III	Media
5	28+400 A 28+410	54,35	III	Media
5	28+410 A 28+420	54,01	III	Media
5	28+420 A 28+430	55,77	III	Media
5	28+430 A 28+440	53,23	III	Media
5	28+440 A 28+450	52,13	III	Media

ZONA	Abs	RMR	CLASE	CALIDAD
5	28+430 A 28+440	53,23	III	Media
5	28+440 A 28+450	52,13	III	Media
5	28+450 A 28+460	48,40	III	Media
5	28+460 A 28+470	48,39	III	Media
5	28+470 A 28+480	58,63	III	Media
5	28+480 A 28+490	53,80	III	Media
5	28+490 A 28+500	56,03	III	Media
5	28+500 A 28+510	48,15	III	Media
5	28+510 A 28+520	51,01	III	Media
5	28+530 A 28+540	44,61	III	Media
5	28+540 A 28+550	55,74	III	Media
5	28+550 A 28+560	52,44	III	Media
5	28+560 A 28+570	54,03	III	Media
5	28+570 A 28+580	50,03	III	Media
5	28+580 A 28+590	44,50	III	Media
5	28+590 A 28+600	55,19	III	Media
6	28+600 A 28+610	52,00	III	Media
6	28+610 A 28+620	54,92	III	Media
6	28+620 A 28+630	55,99	III	Media
6	28+630 A 28+640	52,66	III	Media
6	28+640 A 28+650	56,14	III	Media
6	28+650 A 28+660	52,75	III	Media
6	28+660 A 28+670	44,40	III	Media
7	28+670 A 28+680	55,95	III	Media

5	28+450 A 28+460	48,40	III	Media
5	28+460 A 28+470	48,39	III	Media
5	28+470 A 28+480	58,63	III	Media
5	28+480 A 28+490	53,80	III	Media
5	28+490 A 28+500	56,03	III	Media
5	28+500 A 28+510	48,15	III	Media
5	28+510 A 28+520	51,01	III	Media

7	28+680 A 28+690	52,72	III	Media
7	28+690 A 28+700	50,23	III	Media
7	28+700 A 28+710	50,07	III	Media
7	28+720 A 28+730	49,14	III	Media
7	28+730 A 28+740	55,61	III	Media
7	28+740 A 28+750	54,25	III	Media
7	28+750 A 28+760	58,24	III	Media

Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

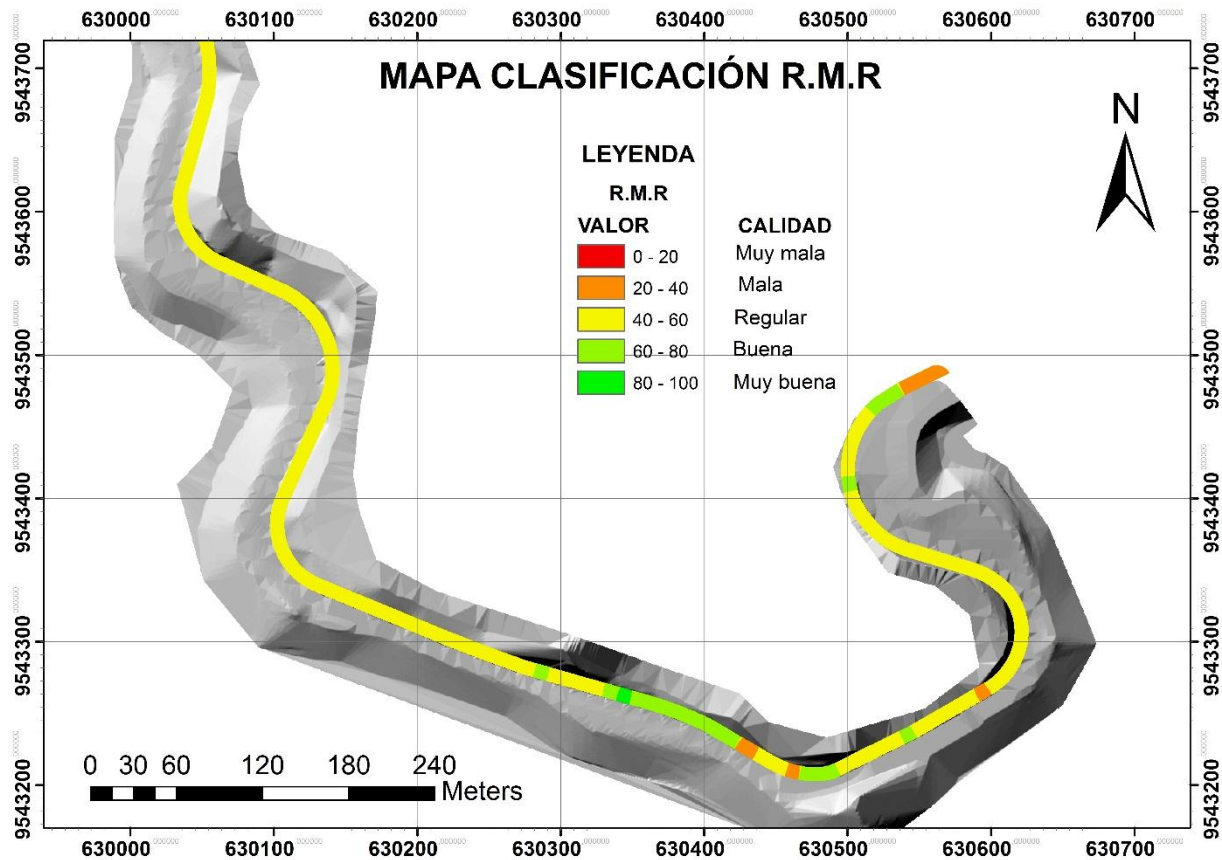


Figura 33. Mapa Clasificación R.M.R.
Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

4.3.3. S.M.R.

El SMR se obtiene a partir de 3 parámetros, el índice RMR básico, el "factor de ajuste" que está dado en función de la orientación de las juntas (producto de tres subfactores) y un "factor de excavación", la sumatoria de estos parámetros da como resultado el valor del SMR, el cual permite determinar la clase, calidad y estabilidad del macizo rocoso.

Se analiza el SMR para los principales mecanismos de rotura: planar y vuelco. En la Tabla 28 y 29 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para la obtención del índice SMR para rotura de tipo planar y vuelco, respectivamente, correspondiente a la zona 1 abs 27+530 a 27+550.

Tabla 28. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del SMR, mecanismo de rotura planar (Zona 1)

ZONA	Abs	Flia	RMR	Factor de Ajuste α_s/α_j			Factor de Ajuste β_j		Factor de Ajuste β_j/β_s			FACTOR DE AJUSTE	Factor de Excavación	SMR	CLASE	CALIDAD	ESTABILIDAD	
				α_s (Direc. Buz. Talud)	α_j (Direc. Buz. Discontinuidad)	A = $ \alpha_j - \alpha_s $	F1	B = β_j (Buz. Discontinuidad)	F2	β_s (Buz. Talud)	β_j (Buz. Discontinuidad)		C = $(\beta_j - \beta_s)$					F3
1	27+530 A 27+550	J1	41,62	310	61	249	0,15	59	1	11	59	48	0	0	41,62	III	Normal	Parcialmente Estable
1	27+530 A 27+550	J2	39,79	310	143	167	0,15	89	1	11	89	78	0	0	39,79	IV	Mala	Inestable
1	27+530 A 27+550	J3	36,40	310	11	299	0,15	50	1	11	50	39	0	0	36,40	IV	Mala	Inestable
1	27+530 A 27+550	J4	36,62	310	197	113	0,15	45	0,918	11	45	34	0	0	36,62	IV	Mala	Inestable

Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

Tabla 29. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del SMR, mecanismo de rotura tipo vuelco (Zona 1)

ZONA	Abs	Flia	RMR	Factor de Ajuste α_s/α_j			Factor de Ajuste β_j		Factor de Ajuste β_j/β_s			FACTOR DE AJUSTE	Factor de Excavación	SMR	CLASE	CALIDAD	ESTABILIDAD		
				α_s (Direc. Buz. Talud)	α_j (Direc. Buz. Discontinuidad)	A = $ \alpha_j - \alpha_s - 180$	F1	B = β_j (Buz. Discontinuidad)	F2	β_s (Buz. Talud)	β_j (Buz. Discontinuidad)		C = $(\beta_j + \beta_s)$					F3	F4
1	27+530 A 27+550	J1	41,62	310	61	69	0,15	59	1	11	59	70	-0,307	0,046	0	41,58	III	Normal	Parcialmente Estable
1	27+530 A 27+550	J2	39,79	310	143	-13	1,00	89	1	11	89	100	-0,552	0,552	0	39,24	IV	Mala	Inestable
1	27+530 A 27+550	J3	36,40	310	11	119	0,15	50	1	11	50	61	0,282	0,042	0	36,35	IV	Mala	Inestable
1	27+530 A 27+550	J4	36,62	310	197	-67	1,00	45	1	11	45	56	0,271	0,271	0	36,35	IV	Mala	Inestable

Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

Los resultados del SMR en función del mecanismo de rotura planar y rotura por vuelco del tramo de vía estudiado se condensan en las tablas siguientes, respectivamente:

Tabla 30. Resultados del SMR, mecanismo de rotura planar

ZONA	Abs	SMR	CLASE	CALIDAD	ESTABILIDAD
1	27+530 A 27+550	41,62	III	Normal	Parcialmente Estable
1	27+530 A 27+550	37,00	IV	Mala	Inestable
2	27+550 A 27+560	62,45	II	Buena	Estable
2	27+550 A 27+560	52,79	III	Normal	Parcialmente Estable
2	27+570 A 27+580	63,43	II	Buena	Estable
2	27+580 A 27+610	55,56	III	Normal	Parcialmente Estable
2	27+610 A 27+620	57,69	III	Normal	Parcialmente Estable
2	27+620 A 27+630	62,03	II	Buena	Estable
2	27+630 A 27+650	56,78	III	Normal	Parcialmente Estable
2	27+660 A 27+910	50,65	III	Normal	Parcialmente Estable
2	27+660 A 27+740	53,84	III	Normal	Parcialmente Estable
3	27+740 A 27+820	49,98	III	Normal	Parcialmente Estable
4	27+820 A 27+910	49,29	III	Normal	Parcialmente Estable
4	27+910 A 27+920	61,01	II	Buena	Estable
4	27+920 A 27+970	56,97	III	Normal	Parcialmente Estable
4	27+970 A 28+000	67,17	II	Buena	Estable
4	28+000 A 28+010	35,61	IV	Mala	Inestable
4	28+010 A 28+030	46,73	III	Normal	Parcialmente Estable
4	28+030 A 28+050	38,87	IV	Mala	Inestable
5	28+050 A 28+150	70,47	II	Buena	Estable
5	28+150 A 28+190	51,50	III	Normal	Parcialmente Estable
5	28+190 A 28+200	61,81	II	Buena	Estable
5	28+200 A 28+600	50,00	III	Normal	Parcialmente Estable
6	28+600 A 28+670	52,31	III	Normal	Parcialmente Estable
7	28+670 A 28+760	52,88	III	Normal	Parcialmente Estable

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

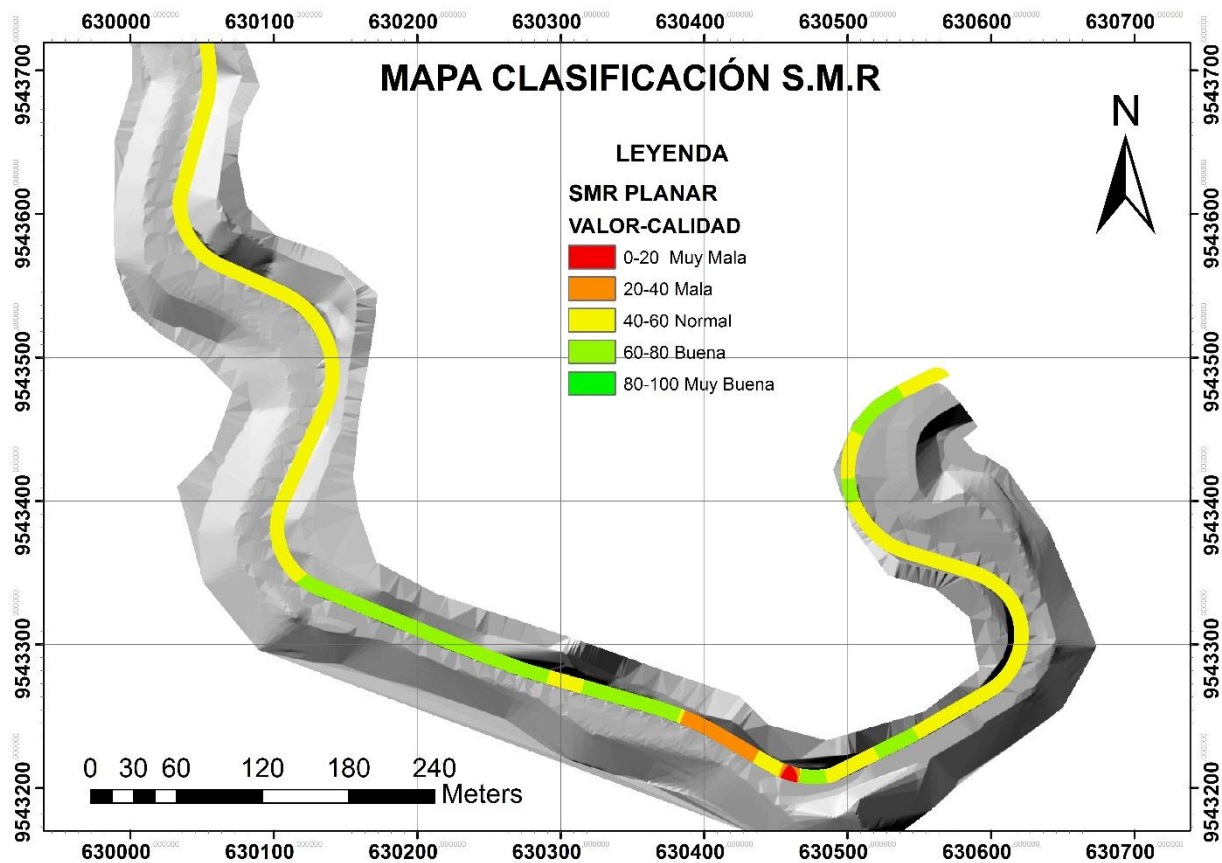


Figura 34. Mapa Clasificación R.M.R. mecanismo de rotura planar
Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

Tabla 31. Resultados del SMR, mecanismo de rotura tipo vuelco

ZONA	Abs	SMR	CLASE	CALIDAD	ESTABILIDAD
1	27+530 A 27+550	38,38	IV	Mala	Inestable
2	27+550 A 27+560	61,02	II	Buena	Estable
2	27+560 A 27+570	48,77	III	Normal	Parcialmente Estable
2	27+570 A 27+580	63,01	II	Buena	Estable
2	27+580 A 27+620	55,78	III	Normal	Parcialmente Estable
2	27+620 A 27+630	61,86	II	Buena	Estable
2	27+630 A 27+740	52,78	III	Normal	Parcialmente Estable
3	27+740 A 27+820	49,79	III	Normal	Parcialmente Estable
4	27+820 A 27+850	46,63	III	Normal	Parcialmente Estable
4	27+850 A 27+860	38,60	IV	Mala	Inestable
4	27+860 A 27+910	52,80	III	Normal	Parcialmente Estable
4	27+910 A 27+920	61,01	II	Buena	Estable
4	27+920 A 27+960	55,79	III	Normal	Parcialmente Estable
4	27+960 A 28+000	65,40	II	Buena	Estable
4	28+000 A 28+010	35,61	IV	Mala	Inestable
4	28+010 A 28+030	46,73	III	Normal	Parcialmente Estable
4	28+030 A 28+050	38,52	IV	Mala	Inestable

5	28+050 A 28+150	70,47	II	Buena	Estable
5	28+150 A 28+190	51,56	III	Normal	Parcialmente Estable
5	28+190 A 28+200	62,72	II	Buena	Estable
5	28+200 A 28+600	50,00	III	Normal	Parcialmente Estable
6	28+600 A 28+670	52,31	III	Normal	Parcialmente Estable
7	28+670 A 28+680	51,04	III	Normal	Parcialmente Estable

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

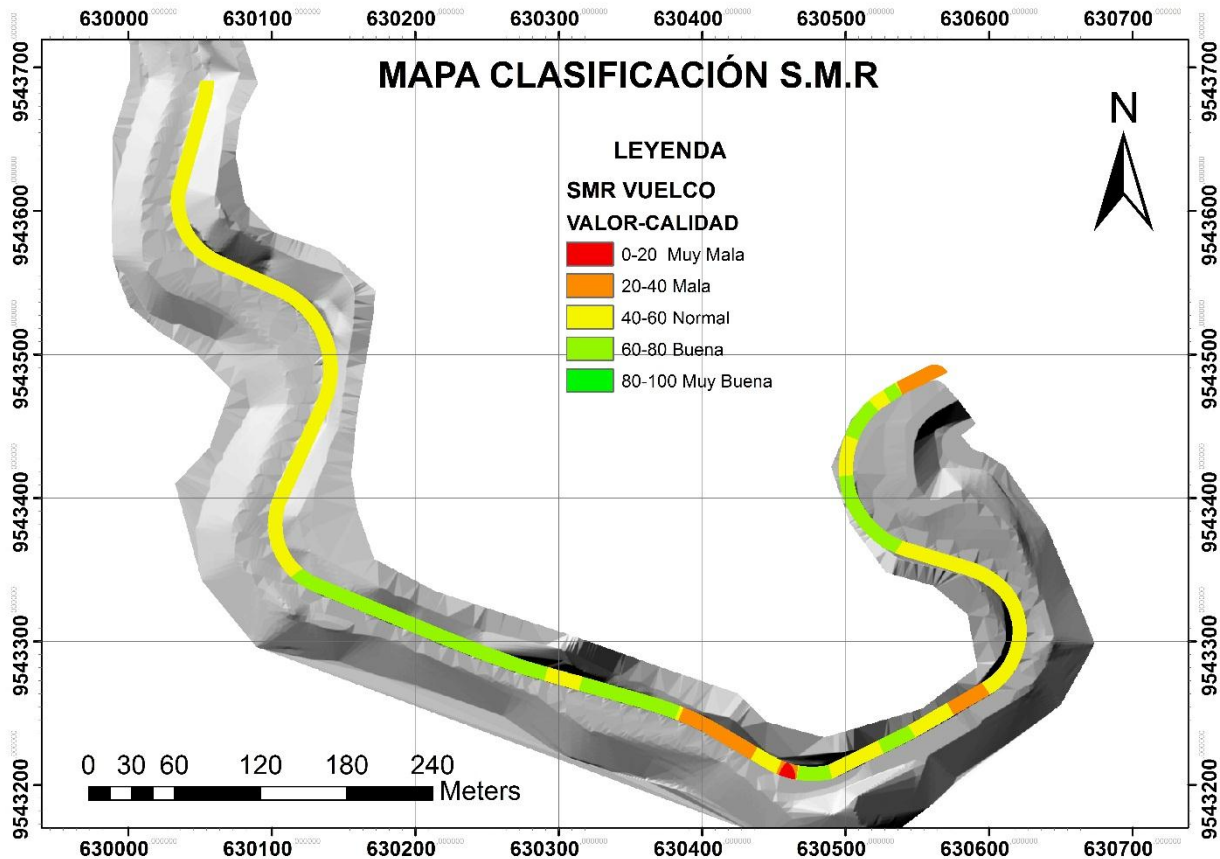


Figura 35. Mapa Clasificación R.M.R. mecanismo de rotura por vuelco

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

4.3.4. Q BARTON

El índice Q de Barton se lo obtiene a partir de 6 parámetros como son: el RQD, número de familias de las juntas (J_n), coeficiente de rugosidad de la junta (J_r), coeficiente de las condiciones de relleno de la discontinuidad (J_a), coeficiente de presencia de aguas (J_w) y el índice de debilitamiento de las discontinuidades (SRF). El producto estos parámetros da como resultado el valor del Q de Barton, el cual permite determinar la calidad del macizo rocoso. En la

Tabla 32 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para la obtención del índice Q correspondiente a la zona 2 abs 27+550 a 27+580.

Tabla 32. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del índice Q Barton

ZONA	Abs	Flia	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q BARTON	CALIDAD
				N° de familias	Coefficiente de rugosidad	Condiciones de relleno	Coefficiente presencia de agua	índice de debilitamiento del macizo		
2	27+550 A 27+560	J3	62,02	9	3	1	1	5	4,133	Mala
2	27+550 A 27+560	J4	62,02	9	4	1	1	5	5,511	Mala
2	27+550 A 27+560	J5	62,02	4	1,5	1	1	5	4,650	Mala
2	27+570 A 27+580	J1	76,93	2	1,5	1	1	5	11,539	Regular
2	27+570 A 27+580	J2	76,93	2	2	1	1	5	15,380	Regular
2	27+570 A 27+580	J3	76,93	2	3	1	1	5	23,070	Regular
2	27+570 A 27+580	J4	76,93	2	1,5	1	1	5	11,535	Regular

Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

Los resultados del índice Q del tramo de vía estudiado se condensan en la tabla siguiente:

Tabla 33. Resultados del índice Q de Barton

ZONA	Abs	Q BARTON	CALIDAD
1	27+530 A 27+550	0	Extremadamente mala
2	27+550 A 27+560	3,603	Mala
2	27+570 A 27+580	15,381	Regular
2	27+580 A 27+600	1,865	Muy mala
2	27+600 A 27+610	11,840	Regular
2	27+610 A 27+670	11,139	Regular
2	27+680 A 27+720	7,132	Mala
2	27+720 A 27+730	2,183	Muy mala
2	27+730 A 27+760	6,032	Mala
3	27+760 A 27+800	9,983	Regular
3	27+800 A 27+830	2,773	Muy mala
4	27+830 A 27+850	6,734	Mala
4	27+850 A 27+910	1,736	Muy mala
4	27+910 A 27+920	19,990	Regular
4	27+920 A 27+960	5,593	Mala
4	27+960 A 27+970	4,368	Mala
4	27+970 A 28+000	22,667	Regular
4	28+000 A 28+010	0,000	Extremadamente mala
4	28+010 A 28+020	1,261	Muy mala
4	28+020 A 28+030	5,584	Mala
4	28+030 A 28+050	0,000	Extremadamente mala
5	28+050 A 28+060	15,522	Regular
5	28+060 A 28+080	3,951	Mala

5	28+080 A 28+090	24,301	Regular
5	28+090 A 28+110	10,326	Regular
5	28+110 A 28+140	15,794	Regular
5	28+140 A 28+180	4,067	Mala
5	28+180 A 28+210	3,170	Mala
5	28+210 A 28+240	5,441	Mala
5	28+240 A 28+280	2,837	Muy mala
5	28+280 A 28+290	0,000	Extremadamente mala
5	28+290 A 28+340	1,960	Muy mala
5	28+340 A 28+370	0,000	Extremadamente mala
5	28+370 A 28+440	4,304	Mala
5	28+440 A 28+470	1,753	Muy mala
5	28+470 A 28+550	5,330	Mala
5	28+550 A 28+580	1,721	Muy mala
5	28+580 A 28+590	0,000	Extremadamente mala
5	28+590 A 28+600	9,094	Regular
6	28+600 A 28+660	4,318	Mala
6	28+660 A 28+670	2,052	Muy mala
7	28+670 A 28+730	3,407	Mala
7	28+730 A 28+740	10,875	Regular
7	28+740 A 28+760	7,478	Regular

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

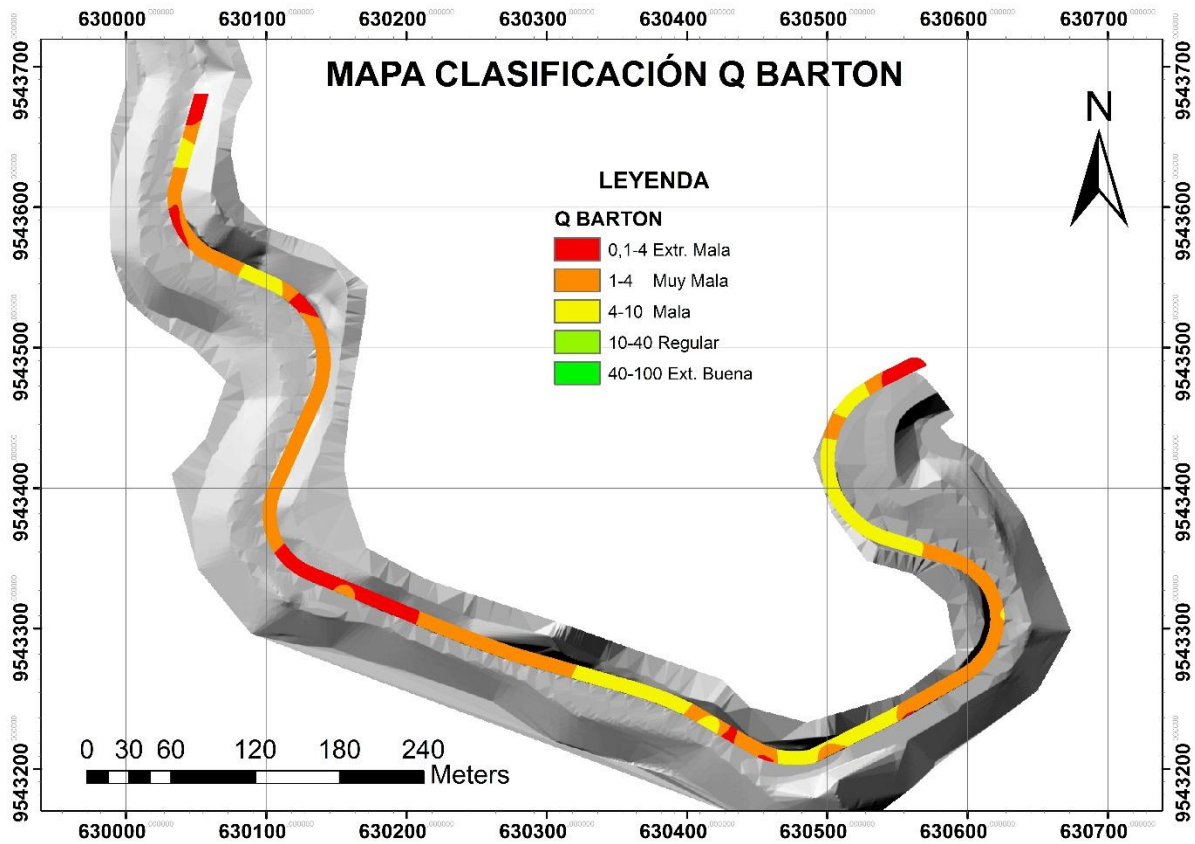


Figura 36. Mapa Clasificación Q Barton
 Fuente: la autora
 Elaborado: por la autora

4.3.5. GSI

Para el cálculo del GSI se utiliza la versión 1989 del índice RMR, propuesto por Bieniawski, suponiendo que el macizo rocoso se encuentra completamente seco, asignándole un valor de 15 al parámetro de condiciones hidrológicas, el valor resultante del índice RMR_{89} se relaciona con el índice GSI de la siguiente forma: $GSI = RMR_{89} - 5$, siempre y cuando el $RMR_{89} > 25$, el valor obtenido permite determinar la calidad del macizo rocoso. En la Tabla 34 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para la obtención del índice GSI correspondiente a la zona 1 abs 27+530 a 27+550.

Tabla 34. Cálculos para determinar la calidad del macizo rocoso en función del índice GSI.

ZONA	Abs	Flia	RMR	GSI	CALIDAD
1	27+530 A 27+550	J1	47,621	42,621	Media
1	27+530 A 27+550	J2	45,793	40,793	Media
1	27+530 A 27+550	J3	42,397	37,397	Mala
1	27+530 A 27+550	J4	42,623	37,623	Mala

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Los resultados del índice GSI del tramo de vía estudiado se condensan en la tabla siguiente:

Tabla 35. Resultados del índice GSI

ZONA	Abs	GSI	CALIDAD
1	27+530 A 27+550	39,61	Mala
2	27+550 A 27+740	52,07	Media
3	27+740 A 27+820	50,01	Media
4	27+820 A 28+000	51,40	Media
4	28+000 A 28+010	35,97	Mala
4	28+010 A 28+050	43,43	Media
5	28+050 A 28+060	63,75	Buena
5	28+060 A 28+150	67,44	Buena
5	28+150 A 28+190	50,63	Media
5	28+190 A 28+200	62,05	Buena
5	28+200 A 28+600	50,37	Media
6	28+600 A 28+670	52,57	Media
7	28+670 A 28+760	52,99	Media

Fuente: por la autora

Elaborado: por la autora

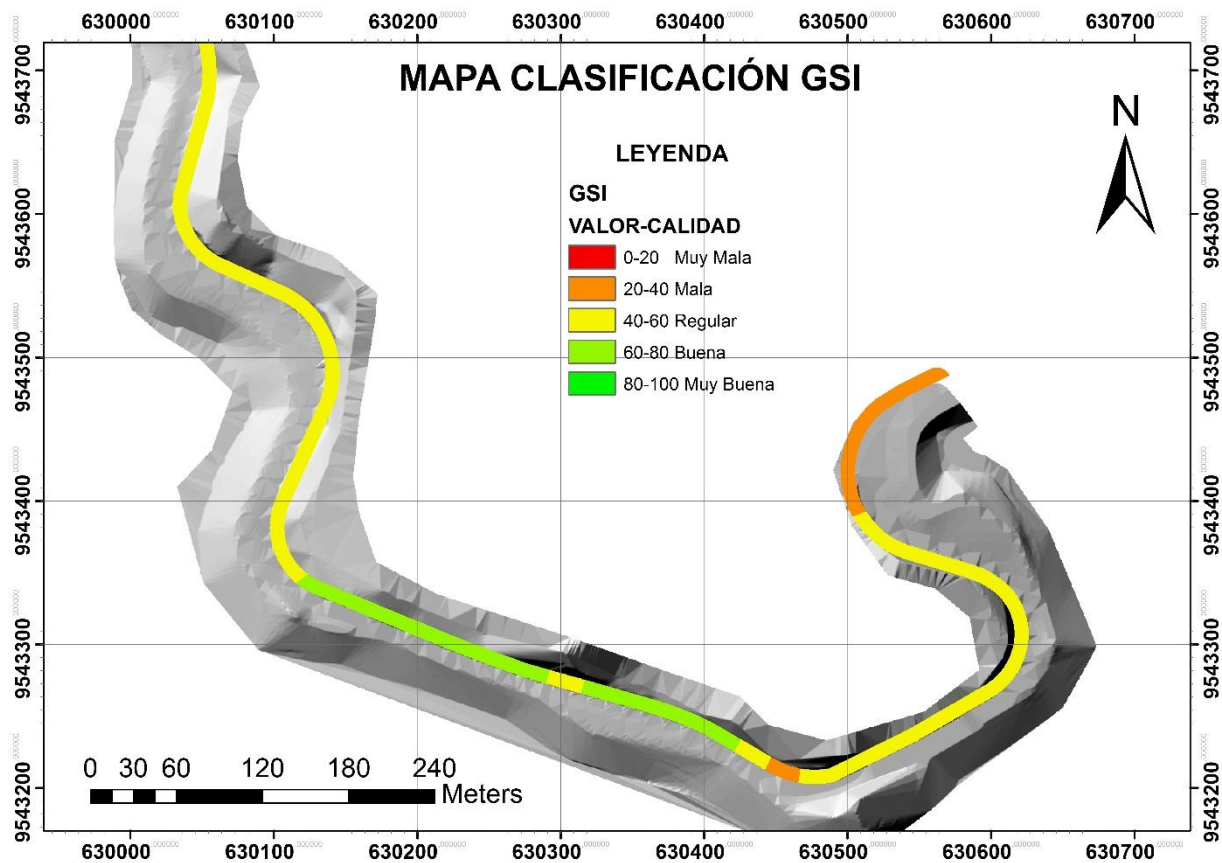


Figura 37. Mapa Clasificación sistema GSI
Fuente: la autora
Elaborado: por la autora

4.4. Parámetros de rotura, método de Hoek & Brown

Se ingresa al programa RocLab un conjunto de datos de entrada (*sigci*, GSI, *mi* y *D*), para calcular los parámetros del criterio de rotura de Hoek-Brown (*mb*, *s* y *a*), valores de entrada como el *sigci* obtenidos en laboratorio mediante el ensayo de resistencia a la compresión simple, valores de entrada *GSI* obtenidos de la clasificación geomecánica, valores de entrada *mi* (parámetro de la roca intacta, dispuestos por el programa RocLab de acuerdo al tipo de roca), de acuerdo al tipo de roca obtenido en la caracterización geológica (Roca Andesita) se obtiene un valor estandarizado *mi* = 25, el valor de entrada *D* hace referencia al factor de perturbación; para nuestro estudio *D*=1 (valor aplicado por la alteración del macizo).

En la siguiente tabla se muestra el resultado los parámetros del criterio de rotura de Hoek-Brown obtenidos para cada una de las zonas de estudio.

Tabla 36. Parámetros de rotura Hoek-Brown

ZONA	Parámetros de Entrada				Parámetros criterio de rotura Hoek-Brown		
	sigci	GSI	mi	D	mb	s	a
	Compresión Simple		Parámetro roca intacta	Factor de Perturbación			
1	106,84	39,67	25	1	0,336	0,0289	0,512
2	106,84	52,07	25	1	0,811	0,0003	0,505
3	89,97	50,01	25	1	0,703	0,0002	0,506
4	44,91	43,6	25	1	0,426	0,0001	0,509
5	98,28	58,84	25	1	1,245	0,0009	0,503
6	84,24	52,57	25	1	0,811	0,0003	0,505
7	82,77	52,99	25	1	0,871	0,0004	0,505

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

Con los valores mb, s y a se obtienen las envolventes de rotura de Hoek-Brown, en la Fig. 38 se proyectan las envolventes de cada una de las zonas de estudio.

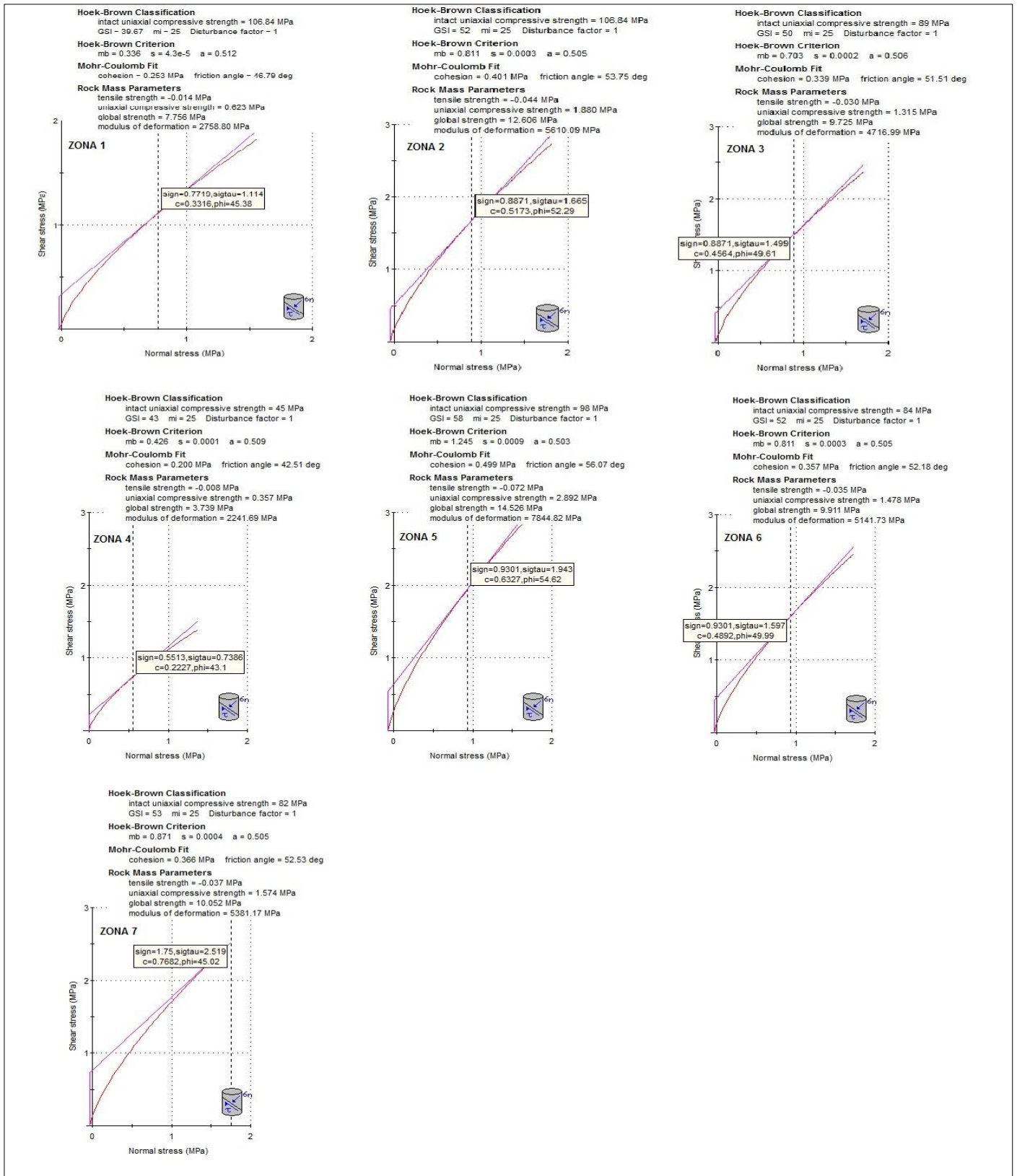


Figura 38. Envolventes de rotura, criterio Hoek- Brown

Fuente: la autora

Elaborado: por la autora

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la presente investigación se ha logrado cumplir con los objetivos presentados, a partir de la caracterización geológica y determinación de los parámetros físico-mecánicas del macizo rocoso, se clasifica al macizo geomecánicamente utilizando los modelos más representativos.

En el presente trabajo investigativo se ha analizado 5 clasificaciones geomecánicas para determinar la calidad del macizo rocoso del tramo de estudio correspondiente 1.33 km: RQD (Deere 1989), R.M.R (Bieniawski 1989), S.M.R (Romana 1985), Q (Barton 1994), y GSI (Hoek & Brown 1995).

De aproximadamente 1330 datos evaluados, por las cinco clasificaciones mencionadas anteriormente, el RQD determina un macizo rocoso de calidad mala a regular, el RMR determina una calidad del macizo de tipo II (Buena) y tipo III (Regular), el SMR según los mecanismos de rotura planar y vuelco determinan una calidad del macizo de tipo II (Buena) y III (Normal), en función del Q de Barton la calidad del macizo varía de regular a mala, y el índice GSI estima una calidad media del macizo rocoso.

Después de realizar un análisis de los resultados obtenidos por estos criterios de clasificación, y teniendo en cuenta la calidad real de estos macizos, derivada de la observación visual, y analizando cada parámetro evaluado y los mapas realizados, se propone que las clasificaciones de R.M.R, Q BARTON y GSI, son los que más se adecuan a las condiciones reales del tramo estudiado, de estas tres metodologías, estimo que la clasificación más aplicable para determinar la calidad del macizo rocoso es el R.M.R. (Bieniawski 1989), puesto que su método a diferencia de los demás, analiza una variedad de parámetros físico-mecánicos del macizo rocoso como: la resistencia a la compresión simple, grado de fracturamiento, la condición de las discontinuidades (abertura, continuidad, rugosidad, alteración, relleno), y las condiciones hidrogeológicas, las cuales permiten estudiar al macizo rocoso. Además, a partir del cálculo del R.M.R. se pueden obtener otras clasificaciones como el S.M.R y el GSI.

CONCLUSIONES

- La geología de la zona de estudio está representada por la Formación Celica compuesta principalmente por rocas ígneas volcánicas; andesitas y tobas andesíticas de lapilli.
- De la fase de análisis geológico se realizó la zonificación litológica de la zona de estudio correspondiente a 1.33 km, esta zonificación da como resultados 8 zonas a ser analizadas
- Se analiza 5 clasificaciones geomecánicas, a partir de las cuales se determina que la calidad del macizo rocoso es de tipo II (Buena) y tipo III (Regular), dando como resultado que la evaluación de la zona de estudio sea estable o parcialmente estable.
De acuerdo a la caracterización geomecánicas, las zonas más susceptibles son la Zona 1, Zona 4 y Zona 8 debido a su alto grado de fracturamiento, por el deterioro que ellos han sufrido por efectos del agua, la erosión y la atmósfera subterránea
- En esencia el RMR, el Q de Barton, y GSI están sin duda en la misma categoría de evaluar la calidad del macizo rocoso, se complementan y correlacionan entre sí.
- La importancia del GSI radica en que se lo utiliza como una de las variables para obtener la resistencia del macizo rocoso mediante el criterio de falla de Hoek-Brown.

RECOMENDACIONES

- Para la caracterización se realiza un levantamiento continuo de la información y se recomienda realizar una línea de escaneo cada 10 metros ya que el abscisado de la vía permite la facilidad en la toma de datos.
- Las clasificaciones geomecánicas deben usarse en conjunto para determinar la clasificación más idónea para un mejor análisis de la calidad del macizo rocoso.
- Para valorar los parámetros cuando se calcula el RMR, se facilita el análisis utilizando las curvas de valoración, ya que estas interpolan el rango de valores determinando de una manera más precisa el valor del parámetro, principalmente facilitar el análisis al utilizar herramientas informáticas.
- Para el estudio de taludes, los sistemas de clasificación más comunes son el RMR de Beniaowski y el GSI de Hoek y Brown.
- Si se quiere aplicar el criterio de Hoek-Brown es necesario conocer el RMR o el GSI
- El uso del Programa RocLab permite el cálculo de parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb a partir de los parámetros de Hoek-Brown es una particularidad muy útil de este programa, puesto que la mayor parte del softwars de ingeniería se escribe aún en términos del criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

BIBLIOGRAFÍA

- Anónimo. (2010). *Cátedra de geotecnia I: Macizos rocosos*. Córdoba-Argentina. Obtenido de <http://www.fotomapgeo.com/files/003-2010-1GEO1-CUAD1-%20%20MACIZOS.pdf>.
- Barton, Lien, & Luden. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. .
- Barton, N., & Choubey, V. (1997). The shear strength of rock joints in Theory and Practice. Rock Mechanics.
- Belandria, N. (2012). *Universidad de los Andes*. Obtenido de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/nbelandria/materias/geotecnia/guia_geotecnia.pdf
- Bhawani Singh, R. K. (2011). *Engineering Rock Mass Classification*. Waltham, USA: Elsevier.
- Bieniawski. (1989). *ENGINEERING ROCK MASS CLASSIFICATIONS*.
- Bieniawski, R. Z. (2011). *Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección*.
- Castillo, D. (2017). *Análisis de estabilidad de macizos rocos mediante el usos de SIG y su aplicación al sector Lucarqui (Loja-Ecuador)*. Obtenido de <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/20360/1/Castillo%20Jaramillo%2C%20Diego%20Israel.pdf>
- Deere, D. (1989). *ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)*. U.S. Army Corps Engrs, Contract R.
- Duque, G. (2016). *MANUAL DE GEOLOGÍA PARA INGENIEROS*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/294/macizorocoso.pdf>
- E.Hoek, & Brown, E. (2007). *Facultad de Cs. Física y Matemáticas*. Obtenido de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/MI46B/1/material_docente/bajar?id_material=143138.
- Eguez, A., & Poma, O. (2001). LA CUENCA ALAMOR-LANCONES EN EL CONTEXTO GEODINAMICO DE LOS ANDES DE HUANCABAMBA, SW ECUADOR.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Paltas. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del GAD Paltas 2014-2019*. Loja.
- Gobierno Autonomo Descentralizado Municipal De Paltas. (2011). *Plan de desarrollo del Cantón Paltas*. Loja.
- Gonzalez de Vallejo, L. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid.

- IEE, & MAGAP. (2013). *Generacion de geoinformacion para la gestión del territorio a nivel nacional. Escala 1:25000*. Paltas, Loja.
- INIGEMM. (2012). *HOJA GEOLÓGICA DE CARIAMANGA*. Obtenido de http://www.geoinvestigacion.gob.ec/mapas/100K_r/HOJAS_GEOLOGICAS_100k/CARIAMANGA_PSAD56_Z17S.compressed.pdf
- LITHERLAND, M. A. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador. Nottingham, British Geological Survey, Overseas Memoir, No. 11, 147 p.*
- Ludeña, J. P. (2016). *“ESTUDIO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE LA GALERÍA DE EXPLORACIÓN AVANZADA EN LA CONCESIÓN MINERA “CHAPADERO G” (CÓDIGO 600009.1) UBICADO EN EL CANTÓN PALTAS PROVINCIA DE LOJA”*. Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/17133/1/Silverio%20Lude%C3%B1a%2c%20Juan%20Pablo.pdf>
- M. Romana, R. T. (2015). *personal.ua.es*. Obtenido de personal.ua.es/va/roberto-tomas/documentos/isrm-smr.pdf
- Palmstrom, A. (2005). *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Tunnels and Underground Space Technology, 20, 362–377.*
- PALTAS, G. A. (2014). *Plan de desarrollo y ordenamiento Teritorial del GADC PALTAS*. Obtenido de http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1160000910001_PDyOT%20%20Can t%C3%B3n%20Paltas%20%20Diagnostico_05-03-2015_10-49-08.pdf
- Paltas, G. d. (2011). *Plan de desarrollo del Cantón Paltas*. Loja.
- Richard, L., & Lesión, P. (s.f.). *Técnicas de proyección estereográfica para geólogos e ingenieros civiles*.
- Rodriguez, F. J. (2007). *Ingeniería Geológica: Caracterización de macizos rocosos*. Obtenido de https://www.academia.edu/7560586/CARACTERIZACION%3%93N_DE_MACIZOS_ROCOSOS?auto=download
- Tegart, P., Gordon, A., & Carstensen, A. (2000). *REGIONAL SETTING, STRATIGRAPHY, ALTERATION and MINERALIZATION OF THE TAMBO GRANDE VMS DISTRICT, PIURA DEPARTMENT, NORTHERN PERU*. Obtenido de http://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual_disk_library/index.cgi/2870166/FID3366/PDF/1247.PDF
- Tomas, R., Delgado, J., Cano, M., & Cuenca, A. (2007). *MODIFICATION OF SLOPE MASS RATING (SMR) BY CONTINUOUS FUNCTIONS*.
- upcommons.up.edu*. (s.f.). Obtenido de upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/06.pdf?sequence=7&isAllowed=y

Z.T.Bieniawski. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*.

ANEXOS

ANEXO 1. ZONIFICACIÓN DE LA ZONA 1

PROYECTO:		Caracterización geomecánica del macizo rocoso, para su aplicación en geotécnia, en el Sector Lucarqui (Loja, Ecuador)				ZONA	1	HOJA/PLANO:	1 / 1
REALIZADO POR:		ANA GABRIELA GONZALEZ & DIEGO I. CASTILLO J				LOCALIZACIÓN:	27+530 A 27+550	FOTO:	1-2
FEHCA:		FEBRERO DE 2017							
LITOLOGÍA	NATURALEZA: VOLCANICO					POTENCIA:	9 M	FORMACIÓN Y EDAD: FORMACIÓN CELICA (CRETÁCICO)	
FORMACIONES SUPERFICIALES	NATURALEZA Y TEXTURA: REGOLITO DE ANDESITA CON COBERTURA VEGETAL FORMADA POR ARBUSTOS Y CEIBOS				MORFOLOGÍA: AFLORAMIENTO VERTICAL ARTIFICIAL, EROSIONADO			ESPESOR: 2-10 m	
ESTRUCTURA	PLIEGUES		FALLAS			OTROS: FAMILIAS DE JUNTAS			
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m3	Muy Grandes <1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy Pequeños >30	Muy brechificado X >60		
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadam blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blandas (Punta de martillo) 2	Media (1 golpe martillo) 3	Dura (+ 1 golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam Dura (Sólo raya con martillo) 6		
GRADOS DE METEORIZACION	I Inalterada (6)		II Ligeramente alterada (5)		III Moderadamente altarada (3)	IV Muy alterada (1)	V Compl meteorizada (0)	VI Suelo residual (0)	
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua		Seco (sin señales de agua)		Húmedo	Goteos	Flujo	CAUDAL ESTIMADO:	
MUESTRAS								OBSERVACIONES:	
FOTO N° 1					FOTO N° 2				
