



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA VIAL

**Análisis de la estabilidad de macizos rocosos mediante el uso de SIG y su
aplicación al sector Lucarqui (Loja, Ecuador)**

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Castillo Jaramillo, Diego Israel

DIRECTOR: Clemente Irigaray, Fernández, PhD

CO-DIRECTOR: Soto Luzuriaga, John, M Sc.

LOJA – ECUADOR

2017



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>

Septiembre, 2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ingeniero Phd

Clemente Irigaray Fernández

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación, denominado: “Análisis de la estabilidad de macizos rocosos mediante el uso de SIG y su aplicación al sector Lucarqui (Loja, Ecuador)” realizado por Diego Israel Castillo Jaramillo, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, agosto de 2017

F

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESION DE DERECHOS

“Yo Castillo Jaramillo Diego Israel declaro ser el autor del presente trabajo de titulación: **Análisis de la estabilidad de macizos rocosos mediante el uso de SIG y su aplicación al sector Lucarqui (Loja, Ecuador)** de la Titulación de Maestría en Ingeniería Vial, siendo Clemente Irigaray Fernández, PhD 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 mi exclusiva responsabilidad.

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

f.....

Diego Israel Castillo Jaramillo

1104238736

DEDICATORIA

A mi familia y apoyo incondicional Ovidio Castillo mi padre, María Elena Jaramillo mi madre, Ovidio e Ivanova mis hermanos.

Diego Castillo

AGRADECIMIENTO

Mi inmenso agradecimiento a mis directores de tesis PhD Clemente Irigaray y M.Sc. John Soto por su guía, a mis amigos amantes de la Geología Ing. Yetzabel Flores e Ing. Juan Viteri por su apoyo, y muy especialmente a mi amiga y compañera de las labores de campo Gabriela Gonzalez por su compañía en el desarrollo de este trabajo de tesis

Diego Castillo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN.....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESION DE DERECHOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	5
1. GENERALIDADES.....	5
1.1. Antecedentes.....	6
1.2. Ubicación y acceso.....	6
1.3. Geología.....	7
1.4. Características geométricas de la vía y taludes.....	10
CAPÍTULO II.....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Definiciones de mecánica de rocas.....	14
2.2. Propiedades físico mecánicas.....	15
2.2.1. Propiedades físico mecánicas de la matriz rocosa.....	15
2.2.2. Propiedades físico mecánicas de las discontinuidades.....	15
2.3. Clasificación geomecánica del macizo rocoso.....	19
2.3.1. Sistemática en la aplicación de la clasificación geomecánica.....	19

2.3.2.	<i>RQD (Rock quality designation)</i>	20
2.3.3.	<i>RMR (Rock mass rating)</i>	21
2.3.4.	<i>SMR (Slope mass rating)</i>	24
2.4.	<i>Análisis cinemático</i>	26
CAPÍTULO III		30
3.	METODOLOGÍA	30
3.1.	<i>Análisis geológico</i>	31
3.2.	<i>Obtención de datos geomecánicos</i>	31
3.3.	<i>Clasificación geomecánica RMR</i>	41
3.4.	<i>Clasificación geomecánica SMR mediante herramientas de SIG</i>	42
3.5.	<i>Análisis cinemático</i>	45
3.5.1.	<i>Condiciones estructurales para rotura plana</i>	46
3.5.2.	<i>Condiciones estructurales para rotura en cuña</i>	46
3.5.3.	<i>Condiciones estructurales para rotura por vuelco</i>	47
CAPÍTULO IV		48
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
4.1.	<i>Análisis geológico</i>	49
4.2.	<i>Obtención de datos geomecánicos</i>	49
4.3.	<i>Análisis cinemático</i>	63
4.3.1.	<i>Rotura planar</i>	63
4.3.2.	<i>Rotura en cuña</i>	65
4.3.3.	<i>Rotura por vuelco</i>	66
4.4.	<i>Cálculo del factor de seguridad</i>	68

4.4.1. <i>Factor de seguridad rotura planar</i>	68
4.4.2. <i>Factor de seguridad rotura en cuña</i>	69
4.5. <i>Susceptibilidad a la generación de procesos de inestabilidad</i>	71
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS	79
ANEXO 1. ANÁLISIS GEOLÓGICO	80
ANEXO 2. OBTENCIÓN DE DATOS GEOMECÁNICOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del proyecto	7
Tabla 2. Rugosidad de acuerdo a índice de rugosidad JRC.....	16
Tabla 3. Clasificación de calidad del macizo rocoso según el índice RQD.....	21
Tabla 4. Clasificación geomecánica de macizos rocosos (RMR básico).	22
Tabla 5. Corrección por la orientación de las discontinuidades.....	22
Tabla 6. Clasificación RMR.....	23
Tabla 7. Características geotécnicas	23
Tabla 8. Orientación de las discontinuidades en el talud.....	23
Tabla 9. Parámetros de corrección para SMR	25
Tabla 10. Valores correspondientes al factor F_4	25
Tabla 11. Descripción de la clasificación SMR.....	26
Tabla 12. Lineamientos de soporte del talud basados en SMR.....	26
Tabla 13. Corrección para reducción de la medida del índice de rebote del martillo de Schmidt cuando el martillo no se encuentra en la posición vertical.....	39
Tabla 14. Funciones continuas para F_1 , F_2 y F_3 . A: paralelismo entre la discontinuidad y dirección de la superficie del talud; B: buzamiento de la discontinuidad β_j ; C: Relación entre el buzamiento de la discontinuidad y el talud.	42
Tabla 15. Propiedades de las variables de entrada del SIG (variables primarias),.....	43
Tabla 16. Propiedades de las variables secundarias del SIG.....	43
Tabla 17. Descripción de las zonas litoestructurales.....	49
Tabla 18. Resumen de datos de laboratorio	52
Tabla 19. Procesamiento de datos de la caracterización geomecánica de la estación 27+530 a 27+550	53

Tabla 20. Cálculo de ángulo de fricción básico y JCS de la estación 27+530 a 27+550	54
Tabla 21. Sectores con valor de SMR menor a 20 en rotura planar y resistencia mecánica	63
Tabla 22. Sectores con valor de SMR menor a 20 en cuña y resistencia mecánica.....	65
Tabla 23. Sectores con valor de SMR menor a 40 en vuelco y resistencia mecánica	67
Tabla 24. Resultados de factor de seguridad a rotura planar	69
Tabla 25. Resultados de factor de seguridad a rotura planar	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Geología Regional, fragmento hoja geológica Cariamanga. Sector de estudio	8
Figura 2. De izquierda a derecha, lavas ansesíticas, tobas andesítica a andesito-basáltica y mineralización de pirolusita.....	9
Figura 3. Esquema tectónico, hoja geológica Cariamanga.	11
Figura 4. Vista de la carretera sector Lucarqui, con dirección al NE, hacia Loja, donde se aprecia la calzada de carretera y talud rocoso.	12
Figura 5. Perfiles típicos de rugosidad para cada rango de JRC. (N Barton & Choubey, 1977)	16
Figura 6. Relación entre Jr en el sistema Q y JRCn para muestras de 200mm y 1000mm en el sistema RMR	17
Figura 7. Puntaje de acuerdo al esfuerzo de la roca intacta.....	23
Figura 8. Puntaje de acuerdo al valor de RQD%.....	24
Figura 9. Puntaje de acuerdo al espaciamiento de las discontinuidades.....	24
Figura 10. Red estereográfica de SCHMIDT.....	27
Figura 11. Principales tipos de roturas de bloque en taludes para diferentes condiciones de geología estructural que pueden causar estos fallos	28
Figura 12. Combinación de análisis cinemático y análisis de estabilidad simple usando el concepto de cono de fricción: (a) cono de fricción en relación con el bloque en reposo en un plano inclinado (es decir); Y (b) proyección estereográfica del cono de fricción superpuesto en las "proyecciones" de las envolventes.	29
Figura 13. Ficha de zonificación	32
Figura 14. Ficha de caracterización	33
Figura 15. Campaña de Relleno de datos. A la izquierda ejecución de medidas de rugosidad con peine de Barton, a la derecha ejecución de ensayo esclerométrico de bajo impacto. ...	34

Figura 16. Campaña de Testificación. A la izquierda ejecución de la labor de perforación, a la derecha personal de campo junto al total de muestras extraídas	35
Fig. 17. Medida de amplitud y longitud de la aspereidad de la junta	36
Figura 18. Gráfico para determinar el JRC en función de la amplitud y longitud de la discontinuidad.....	36
Figura 19. Ensayo de resistencia a la compresión simple en núcleo de zona litoestructural número 6.	37
Figura 20. Valores típicos de resistencia para la mayoría de las rocas, en función del índice de rebote y su densidad.....	38
Figura 21. Medición del valor de rebote con martillo Schmidt de bajo impacto.....	39
Figura 22. Esquema ensayo Tilt Test en núcleos de roca.....	40
Figura 23. Ejecución de ensayo Tilt Test	41
Figura 24. Esquema del cálculo del SMR continuo mediante herramientas de SIG	44
Figura 25. Condiciones estructurales para rotura planar	46
Figura 26. Condiciones estructurales para rotura en cuña	47
Figura 27. Condiciones estructurales para rotura en por vuelco	47
Figura 28. Topografía del tramo de estudio	50
Figura 29. Zonificación litoestructural.....	51
Figura 30. Análisis estadístico de resultados de R.M.R.	55
Figura 31. Mapa de clasificación R.M.R. Correspondiente a los valores mínimos.....	56
Figura 32. Dispersión de datos estructurales de las discontinuidades mostrados en Dips 6.0	57
Figura 33. Cálculo de las orientaciones preferenciales por familia en Dips 6.0,	58
Figura 34. Cálculo de las orientaciones de las cuñas por familia en Dips 6.0,.....	58

Figura 35. Mapa de susceptibilidad a la rotura planar. Correspondiente a los valores mínimos de SMR	60
Figura 36. Mapa de susceptibilidad a la rotura por cuña. Correspondiente a los valores mínimos de SMR	61
Figura 37. Mapa de susceptibilidad a la rotura por vuelco. Correspondiente a los valores mínimos de SMR	62
Figura 38. Análisis cinemático a rotura planar abs 27+590 a 27+600 (Dips 6.0)	64
Figura 39. Análisis cinemático a rotura por cuña abs 28+270 a 28+280 (Dips 6.0)	66
Figura 40. Análisis cinemático a rotura por vuelco abs 28+470 a 28+480 (Dips 6.0)	67
Figura 41. Modelo de talud abs 27+590 a 27+600, a ser analizado a rotura planar	68
Figura 42. Modelo talud abs 27+590 a 27+600 (RocPlane 2.0)	69
Figura 43. Modelo talud abs 28+380 a 28+390 (Swedge 4.0)	70

RESUMEN

El Análisis de Estabilidad de Macizos Rocosos mediante el uso de SIG y su aplicación al Sector Lucarqui, realiza la caracterización geomecánica de 1.2 km de talud rocoso, 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 correspondientes a: compresión simple, densidad, esclerometría en núcleos y ensayo Tilt Test; además, utiliza ecuaciones continuas para la automatización de los cálculos y representación en SIG de la caracterización geomecánica RMR y SMR. Producto de este trabajo se han elaborado mapas de susceptibilidad a rotura planar, por cuña y en vuelco, de los cuales se han establecido puntos para análisis cinemático y cálculo del factor de seguridad en términos determinísticos y probabilísticos. El estudio termina con el análisis de susceptibilidad a generación de procesos de inestabilidad en macizos rocosos utilizando SMR y SIG, según los resultados del caso de estudio del sector Lucarqui y su aplicabilidad a casos similares dentro de taludes en carreteras.

Palabras clave: Geomecánica, taludes rocosos, SIG, RMR, SMR, rotura, inestabilidad.

ABSTRACT

The Stability Analysis of Rocky Massifs using GIS and its application to the Lucarqui Sector, performs the geomechanical characterization of 1.2 km of rock slope, using specialized field equipment for this purpose such as: Barton comb, low impact sclerometer And compass; As well as laboratory tests corresponding to: simple compression, density, sclerometry in cores and Tilt Test; In addition, it uses continuous equations for the automation of the calculations and representation in GIS of the geomechanical characterization RMR and SMR. As a result of this work, maps of susceptibility to planar breakage by wedge and overturning have been developed, from which points have been established for kinematic analysis and calculation of the safety factor in deterministic and probabilistic terms. The study ends with the analysis of susceptibility to the generation of instability processes in rocky massifs using SMR and GIS, according to the results of the Lucarqui sector case study and its applicability to similar cases within slopes in highways.

Keywords: Geomechanics, rocky slopes, GIS, RMR, SMR, rupture, instability.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio trata sobre el Análisis de estabilidad de Macizos Rocos, mediante uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su Aplicación al Sector Lucarqui, ubicado en la provincia de Loja – Ecuador. Su realización es importante para el desarrollo de la ingeniería vial en la rama geotecnia, sub-rama estabilidad de taludes rocosos, integrando conceptos de mecánica de rocas, instrumentos de campo, equipo de laboratorio y uso de SIG. Por otra parte aplica técnicas que permiten evaluar la susceptibilidad a rotura de taludes rocosos en carreteras, importantes para su diseño, planificación y mantenimiento.

El sistema de red vial de un país constituye un eje de progreso económico y social debido a que permite el transporte de productos y personas. Su mantenimiento y desarrollo definen los costos de transporte y por ende la efectividad con que este sistema contribuye al país (Rivera, 2015). Una parte primordial del desarrollo del componente vial es la adecuada gestión de su infraestructura, la cual tiene dos objetivos fundamentales: primero asegurar que se mantenga en buenas condiciones para un funcionamiento continuo, y segundo optimizar el uso de los recursos públicos invertidos (EcuRed, 2016).

Nuestro país, en los últimos años, ha realizado una inversión cercana a 8500 millones de dólares (Andes, 2016) para cambiar la realidad vial del país, contando actualmente con una red vial de 9790 km de longitud (MTOP, 2016); sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos, esta inversión está en riesgo debido a parámetros de diseño, calidad y seguridad que se subestiman o pasan por alto, condicionando los escenarios de uso y la vida útil de estos proyectos.

Una problemática común y a la cual se le presta poca importancia es la inestabilidad y caída de rocas desde los taludes, este fenómeno es la causa de averías en las carrocerías de los vehículos, accidentes de tránsito, y en algunos casos de heridos (LaHora, 2011), además la caída de rocas causa rotura de las capas de rodadura, con costos de reparación, limpieza y mantenimiento (LaHora, 2013).

A pesar que el factor detonante en la mayoría de los casos de inestabilidad en taludes son los periodos invernales que conllevan precipitaciones intensas, la carencia de aplicación práctica de una metodología que evalué la estabilidad de los macizos agrava la situación, siendo la ingeniería de taludes rocosos hoy en día uno de los factores principales en la optimización de obras lineales (carreteras) (Melentijevic, 2005). Dadas estas premisas, la

construcción planificada y adecuada de las carreteras es un tema que requiere de especial atención, siendo el presente trabajo una respuesta a la problemática antes explicada.

Los objetivos del presente trabajo son:

OBJETIVO GENERAL

- Realizar los mapas de susceptibilidad cinemática al deslizamiento por rotura plana, en cuña y por vuelco, así como la cuantificación de la probabilidad de rotura de macizos rocosos, mediante la utilización de herramientas de GIS para analizar e identificar zonas vulnerables a la rotura y caída de rocas en las carreteras.

OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Clasificación geomecánica SMR
- Aplicación de la metodología en SIG.
- Análisis cinemático para diferentes tipos de rotura.
- Análisis del factor de seguridad del talud.
- Aplicación práctica de los resultados obtenidos en el sector de estudio.

Este trabajo sigue la sistemática recomendada por, González de Vallejo et al. (2002), así como también las recomendaciones de Bieniawski (2011), para evitar errores en la clasificación geomecánica. Pero principalmente se basa en las metodologías establecidas en los trabajos investigativos de Irigaray et al. (2001; 2003), Tomas et al. (2009) e Irigaray et al. (2012).

Finalmente la memoria del presente trabajo se estructura de la siguiente manera:

Capítulo 1.- Generalidades del estudio, donde se presentan los antecedentes, ubicación y Acceso y contexto geológico del área de estudio.

Capítulo 2.- Marco teórico en base al alcance del trabajo, donde se discuten los últimos desarrollos en mecánica de rocas y utilización de sistemas de información geográfica.

Capítulo 3.- Metodología seguida para cumplir los objetivos del trabajo.

Capítulo 4.- Resultados y análisis de cada una los objetivos cumplidos.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El Análisis de Estabilidad de Macizos Rocosos mediante el uso de SIG y su aplicación al Sector Lucarqui, corresponde a un trabajo de análisis de la susceptibilidad a rotura de taludes rocosos utilizando herramientas de GIS, que permiten calcular y mostrar en forma gráfica mapas de susceptibilidad al deslizamiento a rotura planar, en cuña y por vuelco. Para tal efecto se tienen como antecedentes los estudios de Irigaray et al. (2001; 2003), Tomas et al. (2009) e Irigaray et al. (2012).

El trabajo es base para la planificación, construcción y mantenimiento de carreteras, donde se presenten taludes rocosos, mostrando la sistemática y metodología utilizada en el análisis de estabilidad, con aplicación práctica de un caso de estudio; el caso de estudio escogido corresponde a un tramo de carretera del sector Lucarqui con talud rocoso. Con respecto a las características biofísicas del área, según el plan de ordenamiento territorial de Guachanamá (Francisco, 2015), el sector Lucarqui presenta un relieve colinado, con clima cálido húmedo, precipitaciones medias anuales que varían desde 700mm hasta 1500 mm, siendo los meses con mayores precipitaciones del año enero, febrero, marzo y abril; las temperaturas varían de 12°C a 24°C y, velocidades de viento media anual de 2.3 km/h.


Para sustento del trabajo se han utilizado herramientas propias de caracterización geomecánica como Peine de Barton, equipo Tilt Test y esclerómetro de bajo impacto, herramientas de GIS, herramientas de análisis cinemático a rotura planar, en cuña y por vuelco utilizando redes estereográficas, herramientas de análisis del factor de seguridad a rotura planar y en cuña, y ensayos de laboratorio.

1.2. Ubicación y acceso

El área de estudio corresponde a un tramo de la carretera de 1.2 km de longitud, localizado en la carretera Troncal de la Sierra E35, a la altura del poblado Lucarqui perteneciente a la parroquia Guachanamá, Cantón Paltas, Provincia de Loja, Ecuador. Desde la capital provincial Loja, el área de estudio se encuentra a 140 Km de distancia aproximadamente, se accede pasando por los poblados de Catamayo, San Pedro de la Bendita, Catacocha y Lucarqui en un recorrido de 2 horas y media.

El tramo de carretera se encuentre en las abscisas 27+530 a 28+800 del marcado vial existente, entre las coordenadas mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas del proyecto

Proyecto	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)	
Inicio	630510	9543423	884	
Fin	630019	9543825	810	

Fuente: El Autor
 Elaborado por: El Autor

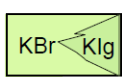
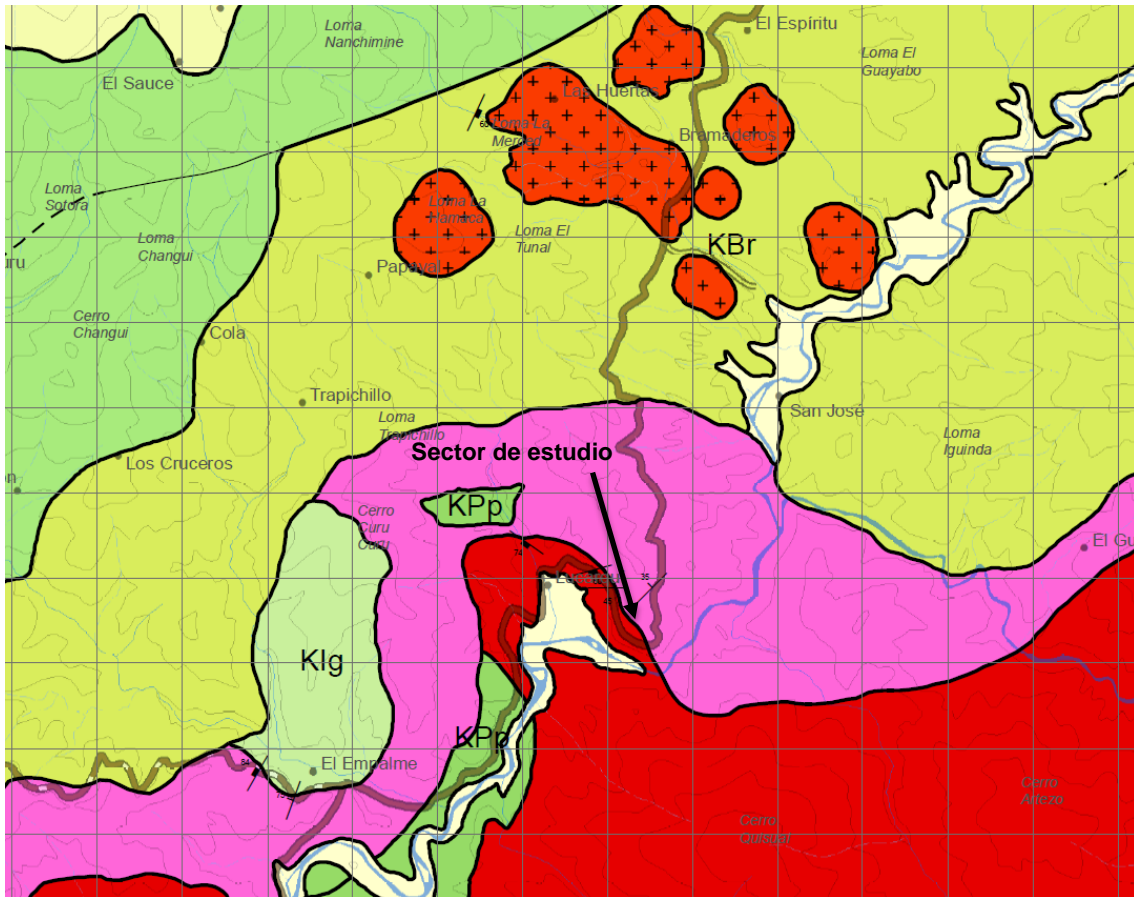
1.3. Geología

El área de estudio se encuentra emplazada en la región oriental de la cueca Alamor Lancones; la cual constituye una estructura elongada con orientación predominante de rumbo E-W; las unidades litológicas que ocurren en el sector oriente son predominantemente de origen volcánico depositadas mayormente en un ambiente marino y varían desde lavas de composición basáltica y afinidad toleítica hasta sedimentos silíceos finogranulares. Las facies de origen volcánico son instruidas por el Batolito de Tangula (IGEMMET & DINAGE, 2005).

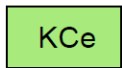
1.3.1. Geología regional.

Unidad punta de piedra (Kpp).

Esta unidad del Cretácico inferior (Aptiense) comprende una secuencia representada principalmente por basaltos de afinidad toleítica que ocurren en mantos masivos fracturados de color negro verdoso, textura afanítica y a veces silicificados, y gabros en menor proporción que constituyen cuerpos intrusivos pequeños de color negro y textura fanerítica. Esta unidad se encuentra sobreyacida transicionalmente por la Unidad Celica e intruída por el Batolito de Tangula. Tiene un ambiente de formación correspondiente a arco de islas submarino (INIGEMM, 2012).



Unidad Bramaderos/Unidad Iguinda:
Aglomerados, tobas intercalados con sedimentos turbfícos fosilíferos.



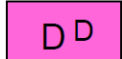
Unidad Celica:
Brechas, lavas basalto andesfícas y hialoclastitas.



Unidad Punta de Piedra:
Lavas basálticas, gabros uralitizados.



Subvolcánicos/Intrusivos Indiferenciados



Diorita



Granodiorita



Batolito de Tangula

Figura 1. Geología Regional, fragmento hoja geológica Cariamanga. Sector de estudio

Fuente: (INIGEMM, 2012)

Elaborado por: El Autor

Unidad Celica (KCe).

Unidad del Cretácico inferior (Alviano), redefinida como secuencia volcanoclástica, intercalada con mantos de lava de composición basalto-andesítico, las cuales se encuentran generalmente silicificadas, cloritizadas y epidotizadas en menor grado. Las facies volcanoclásticas se encuentran conformadas principalmente por hialoclastitas de color verde con tonalidades gris-oscuro, las cuales contienen fragmentos de rocas volcánicas de composición básica-intermedia de color rojizo dentro de una matriz lávica de textura afanítica con gran cantidad de vidrio volcánico y minerales de alteración como clorita y epidota. Estas rocas representan la parte más proximal del arco volcánico submarino Punta de Piedra (INIGEMM, 2012).

1.3.2. Geología local.

El tramo de vía en estudio se encuentra emplazado sobre la Unidad Celica, específicamente sobre tobas y lavas de composición andesítica a andesito-basáltica (Fig. 2). Las rocas son de color gris verdoso, las lavas tienen textura afanítica con pirolusita o calcita; las tobas presentan horblenda y plagioclasa en general presentan alteraciones de epidota y clorita.



Figura 2. De izquierda a derecha, lavas andesíticas, tobas andesítica a andesito-basáltica y mineralización de pirolusita.

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

1.3.3. Geodinámica y geología estructural.

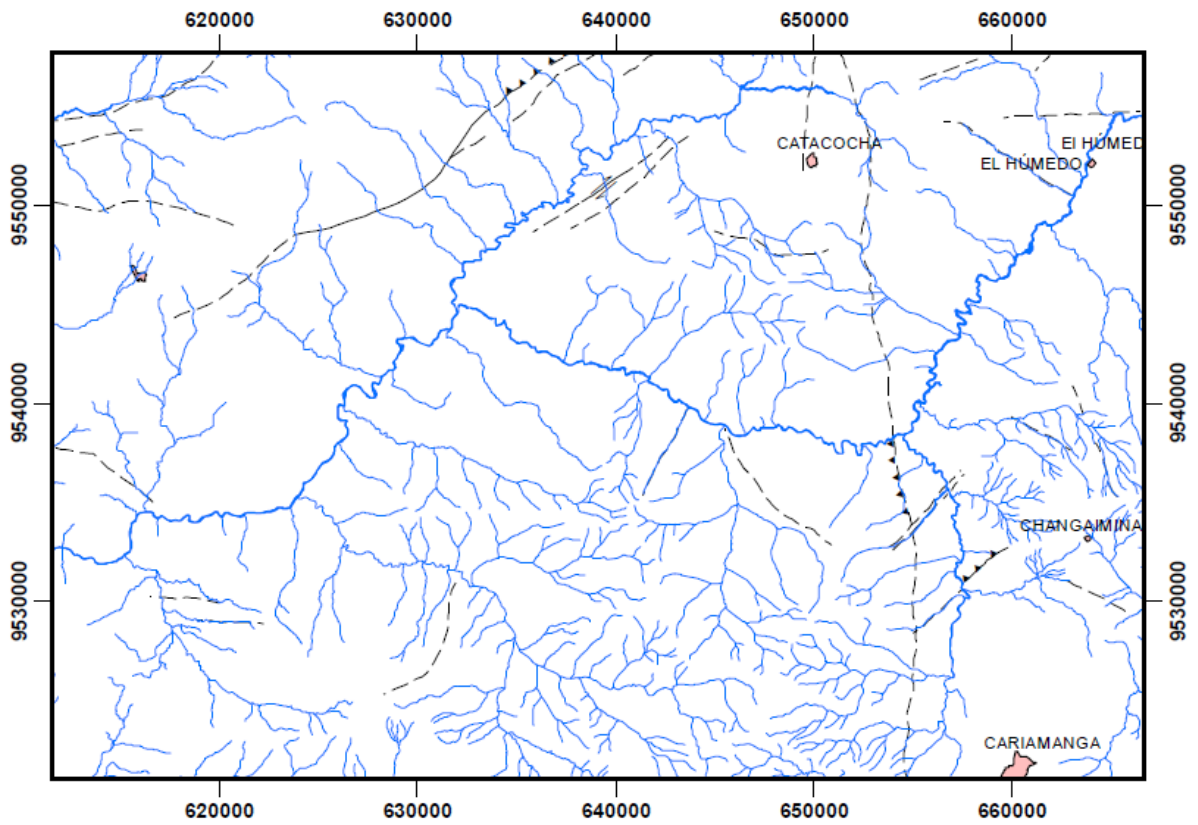
La Cuenca Alamor Lancones corresponde a una Cuenca Oceánica Marginal Cretácica desarrollada desde el Neocomiano, emplazada por el desmembramiento del Bloque Amotape Tahuin (BAT) producto del proceso de translación / rotación a lo largo de la Falla Las Aradas. (Eguez & Poma, 2001). En la hoja geológica 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 variando a E-O buzando al NO y N limitando la margen NO de la cuenca del Río Playas y la falla Bella María con dirección NO-SE, tendiendo a N-S con ángulo de buzamiento al O, que se encuentra al oeste de la ciudad de Catacocha y pone en contacto rocas del basamento oceánico al oeste con rocas volcánicas de arco continental (ver figura 3).

El diaclasamiento del macizo rocoso en tramo de estudio, no presenta una dirección preferencial definida, sin embargo la mayoría de fracturas buzando en un barrido de SO a E con un valor medio de 72° y en dirección NE con un valor medio de 38° .

1.4. Características geométricas de la vía y taludes

El tramo de vía tiene una sección de 8.2m más cunetas de 0.80m, su capa de rodadura es de pavimento asfáltico, con señalización horizontal y vertical, dentro del tramo de vía encontramos cuatro alcantarillas y dos muros de contención de la mesa. La vía tiene un desnivel descendente de 74m desde el inicio hasta su final, con una pendiente longitudinal promedio de 7.4%. (Ver fig. 4)

En cuanto a sus taludes, los mismos se encuentran concentrados a la derecha de la vía en el sentido de avance; a excepción de la abscisa 27+880 en la cual se encuentra un corte cerrado con talud a ambos lados. La pendiente de los taludes de corte son en general 1H:2V, con desnivel máximo de 20m; la pendiente natural del terreno tiene una relación cercana a 2H:1V.



- Falla**
- Falla Observada
 - - - Falla Inferida
 - Falla Cubierta
 - ▼▼▼ Falla Inversa Inferida
 - ▼▼▼ Falla Inversa Observada
 - ⇌ Falla Transcurrente Dextral

Figura 3. Esquema tectónico, hoja geológica Cariamanga.
 Fuente: (INIGEMM, 2012)
 Elaborado por: El Autor



Figura 4. Vista de la carretera sector Lucarqui, con dirección al NE, hacia Loja, donde se aprecia la calzada de carretera y talud rocoso.

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

El análisis de estabilidad de macizos rocosos exige conocimiento de conceptos fundamentales, manejo de equipos de campo y laboratorio para evaluación de propiedades físico-mecánicas y resistencia al corte, así como conocimientos de clasificación geomecánica y análisis cinemático.

2.1. Definiciones de mecánica de rocas

El texto INGENIERÍA GEOLÓGICA de González de Vallejo et al. (2002), nos da claramente algunos conceptos fundamentales de la mecánica de rocas, básicos para el entendimiento del presente trabajo:

“**La mecánica de rocas** se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerza aplicada en su entorno físico.

Las masas rocosas aparecen en la mayoría de los casos afectadas por **discontinuidades** o superficies de debilidad que separan bloques de **matriz rocosa** o <<roca intacta>> constituyendo en conjunto los **macizos rocosos**

Matriz rocosa es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de <<roca intacta>> que quedan entre ellas. La matriz rocosa a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su micro-textura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad.

Una **discontinuidad** es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. Generalmente la resistencia a la tracción de los planos de discontinuidad es muy bajo por su resistencia al corte o, en su caso, por la del material de relleno.

Macizo rocoso es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos. Prácticamente puede considerarse que presentan una resistencia a la tracción nula.”

2.2. Propiedades físico mecánicas

2.2.1. 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 medio de la apreciación o ensayo en campo, y por medio de ensayos de laboratorio. Las propiedades físicas a determinarse en el presente trabajo son: tipo de roca, color y densidad, mientras que las propiedades mecánicas: resistencia a la compresión.

Las propiedades físicas de la matriz rocosa, se evalúan en su mayor parte a través de levantamiento geológico a detalle, mientras que para la evaluación de las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, se utiliza el ensayo de compresión simple o resistencia al rebote del martillo de Schmidt en función de su densidad (Deere & Miller, 1966), sobre testigos de perforación o muestras talladas en laboratorio.

2.2.2. Propiedades físico mecánicas de las discontinuidades.

De la misma manera que para la matriz rocosa, es necesario conocer las propiedades físico mecánicas de las discontinuidades. Las propiedades físicas a evaluarse son: estructura, rugosidad, grado de meteorización y humedad, y las propiedades mecánicas: resistencia a la compresión simple de la pared de la discontinuidad y resistencia al corte.

Las propiedades físicas de las discontinuidades se evalúan en campo y en laboratorio a través de los sistemas de clasificación geomecánica, donde resalta la rugosidad por su incidencia en la resistencia al deslizamiento.

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 2). Para la evaluación de la rugosidad se pueden utilizar los perfiles de Barton & Choubey (1977) mostrados en la figura 5, o los perfiles de Barton & Bandis (1990) mostrados en la figura 6 donde además se realiza una comparación con el índice Jr del sistema Q de Barton et al. (1974). 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, siendo útil en rangos de bloques pequeños (menores a 30cm).

Tabla 2. 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: El Autor

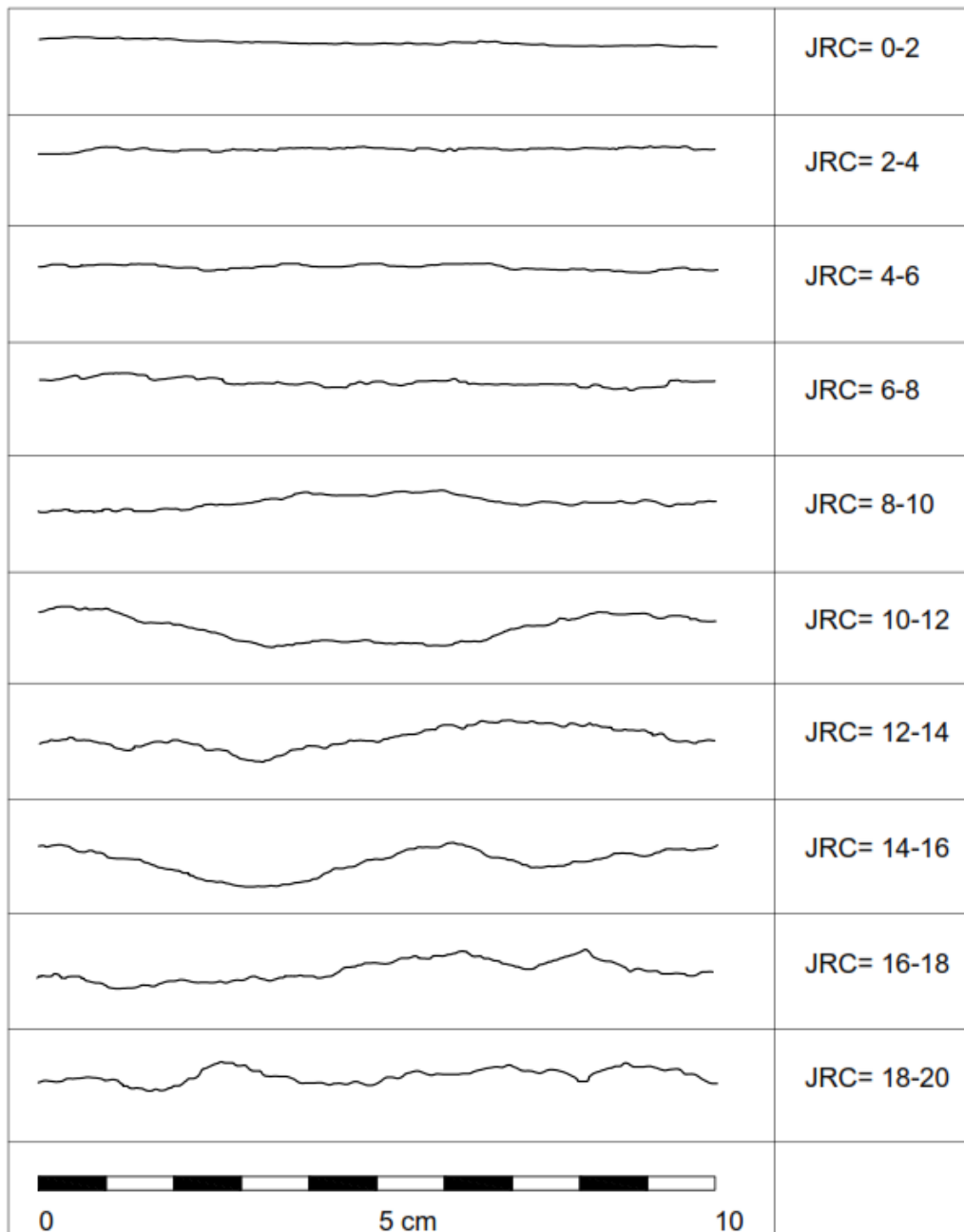


Figura 5. Perfiles típicos de rugosidad para cada rango de JRC. (N Barton & Choubey, 1977)

Fuente: (Barton & Choubey, 1977)
Elaborado por: El Autor

En la figura 6, se compara el índice Jr con la medida de la rugosidad JRC para muestras de 200mm y 1m, observándose el efecto de escala que tiene la muestra sobre el valor medido en el caso del sistema RMR, y la independencia de la escala en el caso del sistema Q. De esta manera los perfiles de rugosidad de la figura 5, son representativos para muestras de esa escala.

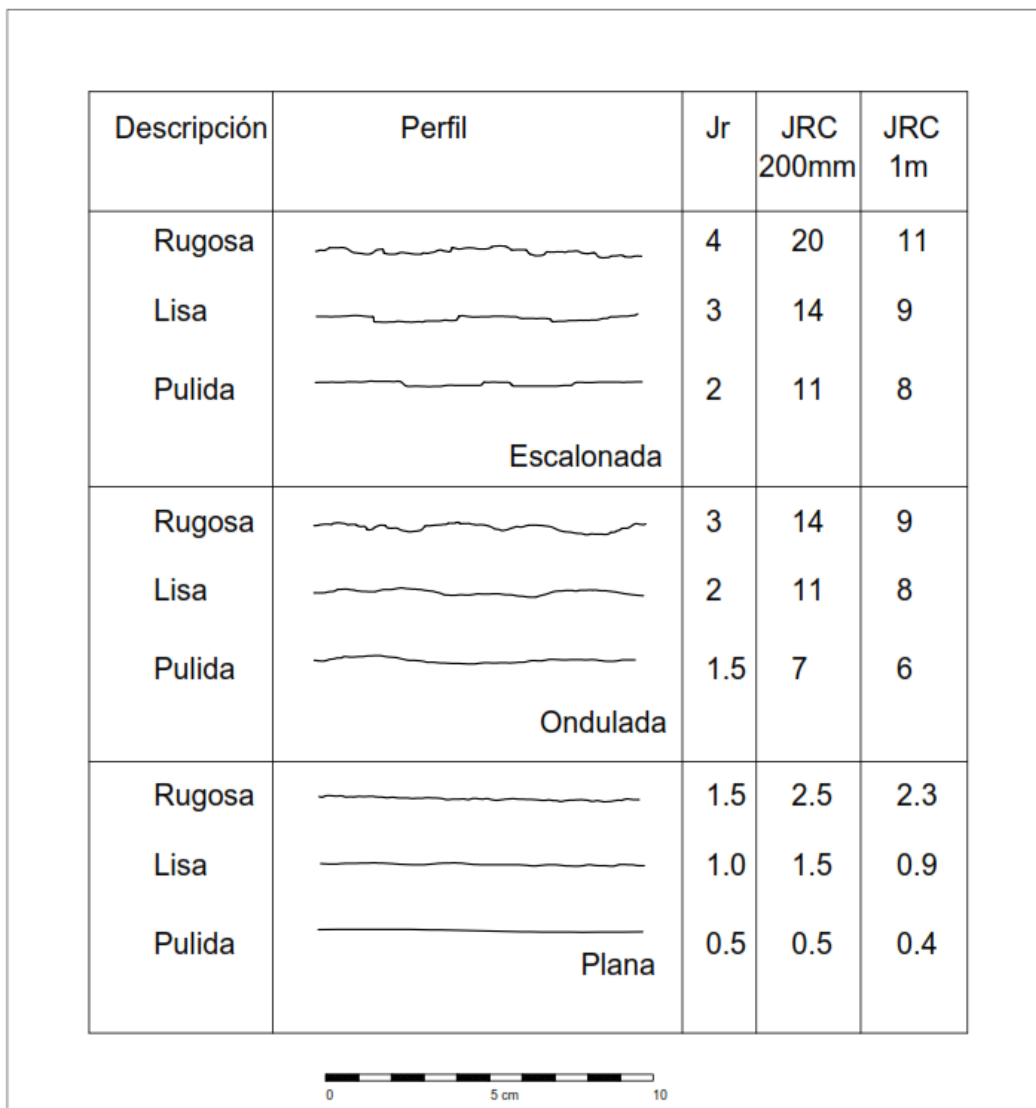


Figura 6. Relación entre Jr en el sistema Q y JRCn para muestras de 200mm y 1000mm en el sistema RMR

Fuente: (Barton & Bandis, 1990)

Elaborado por: El Autor

La propiedad mecánica de las discontinuidades de resistencia a la compresión, no puede evaluarse a través del ensayo de compresión simple, sin embargo al igual que en el caso de la matriz rocosa se puede utilizar el valor del rebote del martillo de Schmidt en función de su densidad (Deere & Miller, 1966). El índice de resistencia a la compresión simple de las paredes de las discontinuidades se denomina JCS según el sistema RMR de Bieniawski (1989).

La propiedad mecánica de resistencia al corte de las discontinuidades está definido principalmente por su ángulo de fricción pico. Barton (1973) describe una ecuación empírica para determinar la resistencia pico al corte en el plano de las discontinuidades. Esta ecuación se escribe de la siguiente manera:

$$\tau = \sigma n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma n} \right) + \phi_r \right]$$

Donde: τ _ esfuerzo pico al corte

σn _ Esfuerzo normal efectivo

JRC _ coeficiente de rugosidad de la discontinuidad

JCS _ esfuerzo a la compresión de la pared de la discontinuidad

ϕ_r _ ángulo de fricción residual o básico en rocas inalteradas, el cual puede ser avaluado mediante el ensayo Tilt Test.

En esta ecuación $\left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma n} \right) + \phi_r \right]$ representa el ángulo de fricción pico de la roca y $JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma n} \right)$ el ángulo de rugosidad, de manera que, el esfuerzo pico al corte también se puede expresar como:

$$\tau = \sigma n \tan[\phi_p]$$

O, como:

$$\tau = \sigma n \tan[\phi_i + \phi_r]$$

$$\phi_i = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma n} \right)$$

Donde: ϕ_p _ ángulo de fricción pico

ϕ_i _ ángulo de rugosidad

ϕ_r _ ángulo de fricción residual

Para grandes esfuerzos el ángulo de rugosidad se considera cero y para esfuerzos muy pequeños se debe usar un valor fijo, así:

$$\begin{aligned} \phi_i &= 0, \text{ cuando } \frac{JCS}{\sigma_n} \leq 1 \\ \phi_i &= JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right), \text{ cuando } 1 > \frac{JCS}{\sigma_n} \geq 50 \\ \phi_i &= 1.7JRC, \text{ cuando } \frac{JCS}{\sigma_n} > 50 \end{aligned}$$

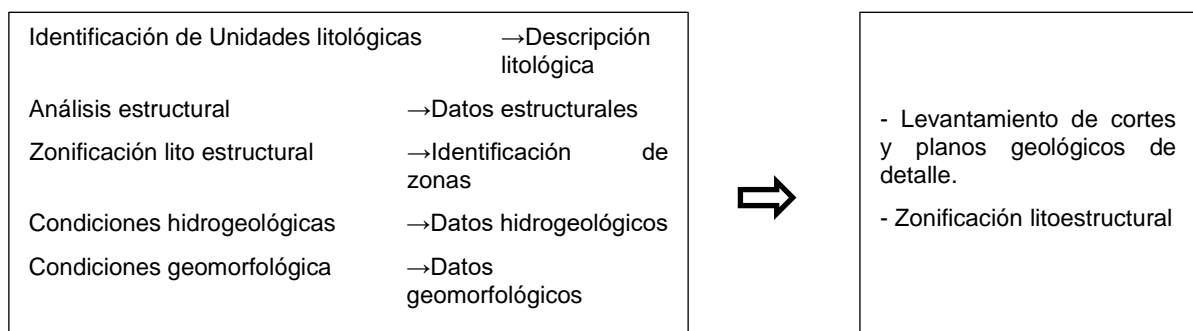
2.3. Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Como ya se vio en los conceptos previos, el macizo rocoso no está conformado solamente su matriz, sino también por sus discontinuidades, y es así que para caracterizar al macizo rocoso, no basta con tener las propiedades físico y mecánicas de la matriz rocosa, sino que a ellas se suman las propiedades físico y mecánicas de las discontinuidades. En este trabajo se evaluarán los índices índice RQD (Deere, 1989), RMR (Bieniawski, 1989) y SMR (Romana, 1985).

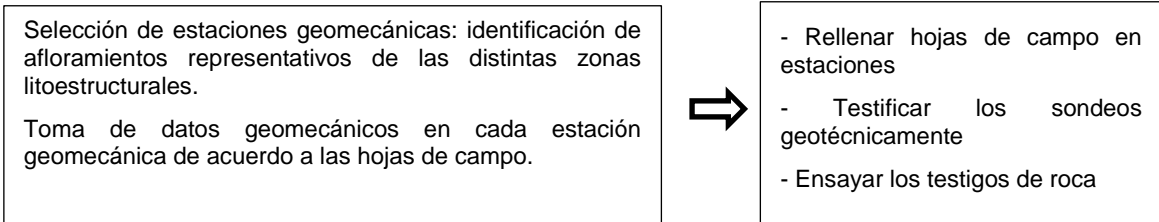
2.3.1. Sistemática en la aplicación de la clasificación geomecánica.

A continuación se presenta la sistemática de VALLEJO et al. (2002) para la clasificación geomecánica de macizos rocos, modificada por el Autor para la aplicación mediante herramientas de GIS:

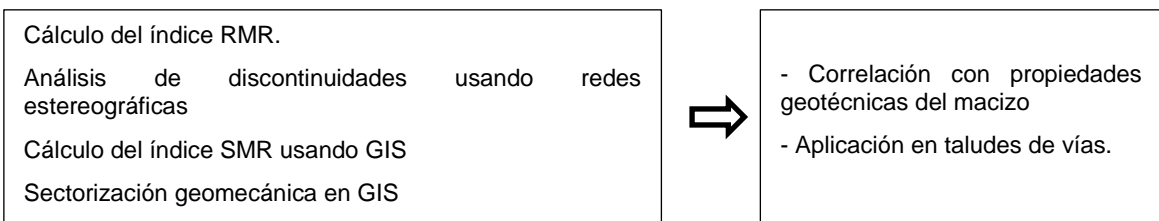
1. *Análisis geológico del macizo.*- Se realiza en dos etapas, la primera consiste en el levantamiento topográfico y geológico, y la segunda consiste en la zonificación litoestructural en base a los datos obtenidos.



2. *Obtención de datos geomecánicos.*- Se obtiene en tres etapas, la primera y la segunda de obtención de datos y testificación respectivamente, y otra de laboratorio, todo en base a la zonificación litoestructural precedente.



3. *Cálculo del índice de calidad de la roca.*- Finalmente se realiza la correlación de las propiedades geotécnicas del macizo rocoso en base a la clasificación geomecánica, cuyos índices se aplican en el análisis de estabilidad de macizos rocosos.



2.3.2. RQD (Rock quality designation).

El índice RQD (Deere, 1989), es el porcentaje de recuperación de testigos de roca de más de 10 cm de longitud en su eje, sin tener en las fracturas recientes de la labor de perforación, con respecto a la longitud del sondeo. (Tabla 3)

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de los trozos de testigo} > 10\text{cm}}{\text{longitud total}} \times 100$$

Tabla 3. Clasificación de calidad del macizo rocoso según el índice RQD

RQD %	Calidad
< 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 – 75	Media
75 – 90	Buena
90 - 100	Muy buena

Fuente: (Deere, 1989)
Elaborado por: El Autor

2.3.3. RMR (Rock mass rating).

La clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989), es un sistema de clasificación de macizos rocosos que toma en cuenta los siguientes parámetros geotécnicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturamiento en términos del RQD.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

La clasificación RMR básica resulta de la suma de los 5 parámetros establecidos en la tabla 4 y representada de acuerdo a las tablas 6 y 7, pudiendo ser corregida por orientación del talud (tablas 5 y 8).

$$RMR_{89} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Donde: 1_ Parámetro 1 tabla 4 o figura 7

2_ Parámetro 2 tabla 4 o figura 8

3_ Parámetro 3 tabla 4 o figura 9

4_ Parámetro 4 tabla 4

5_ Parámetro 5 tabla 4

Los parámetros de RMR, pueden ser calculados en forma continua por las figuras 7, 8 y 9.

Tabla 4. Clasificación geomecánica de macizos rocosos (RMR básico).

Parámetros		Rango de Valores							
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	<0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel	Nulo	<10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	>0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Fuente: (Bieniawski, 1989)
Elaborado por: El Autor

Tabla 5. Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy Desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: (Bieniawski, 1989)
Elaborado por: El Autor

Tabla 6. Clasificación RMR

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

Fuente: (Bieniawski, 1989)
 Elaborado por: El Autor

Tabla 7. Características geotécnicas

Clase	I	I	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15m de vano	6 meses con 8m de vano	1 semana con 5m de vano	10 horas con 2.5m de vano	30 minutos con 1m de vano
Cohesión	>4 Kp/cm ²	3 - 4 Kp/cm ²	2 - 3 Kp/cm ²	1 - 2 Kp/cm ²	<1 Kp/cm ²
Angulo de rozamiento	>45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	<15°

Fuente: (Bieniawski, 1989)
 Elaborado por: El Autor

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 favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	

Fuente: (Bieniawski, 1989)
 Elaborado por: El Autor

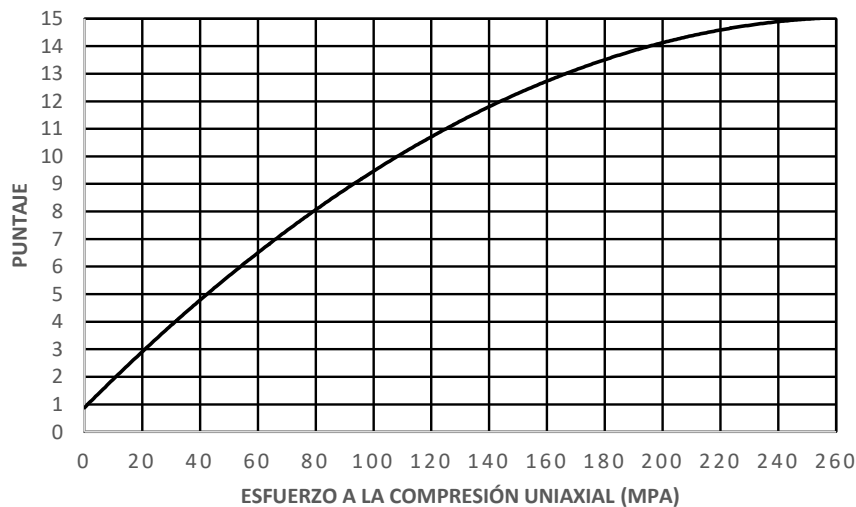


Figura 7. Puntaje de acuerdo al esfuerzo de la roca intacta

Fuente: (Bieniawski, 1989)
 Elaborado por: El Autor

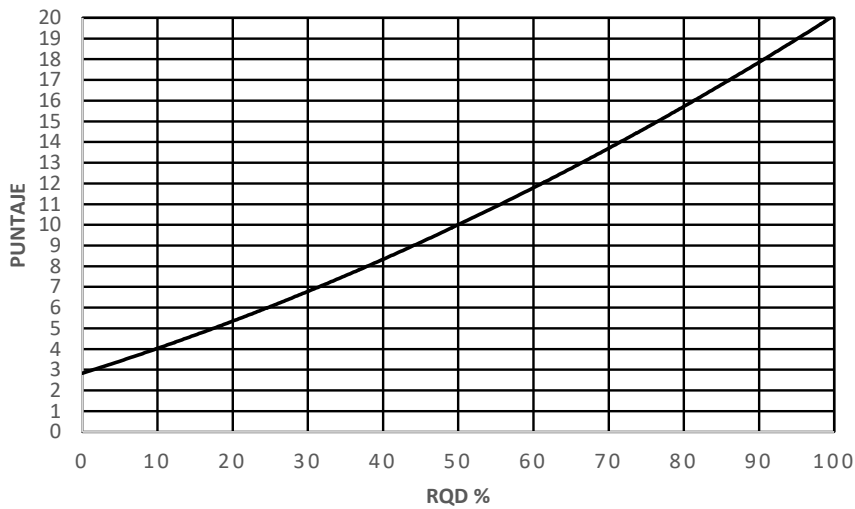


Figura 8. Puntaje de acuerdo al valor de RQD%

Fuente: (Bieniawski, 1989)

Elaborado por: El Autor

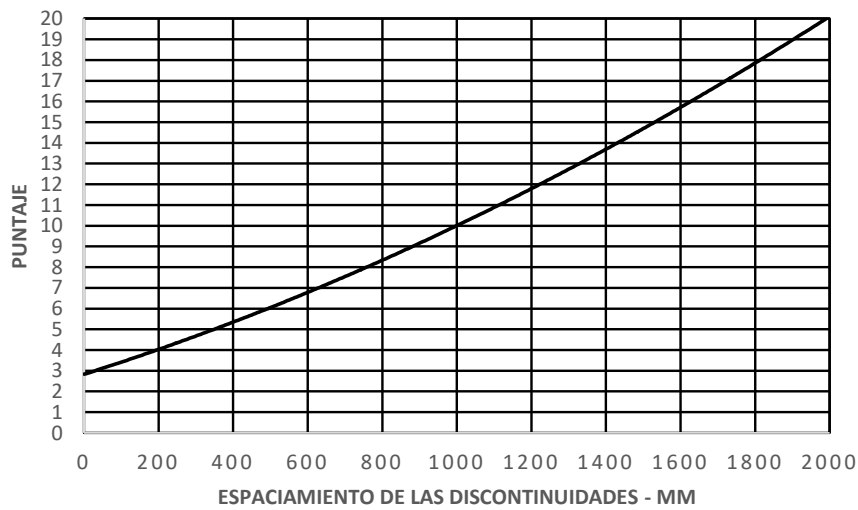


Figura 9. Puntaje de acuerdo al espaciamiento de las discontinuidades

Fuente: (Bieniawski, 1989)

Elaborado por: El Autor

2.3.4. SMR (Slope mass rating).

El índice SMR (Romana, 1985) se calcula por medio de una corrección del RMR básico de Bieniawski (1989), por medio de la siguiente expresión:

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

Donde: RMRb_ RMR básico de la clasificación de macizo rocoso de Bieniawski

$(F_1 * F_2 * F_3)$ _ Factor de ajuste de las discontinuidades (tabla 9)

F_1 _ Factor de ajuste que depende del paralelismo entre la dirección de las discontinuidades y la dirección de la superficie del talud.

F_2 _ Factor de ajuste que depende del buzamiento de las discontinuidades

F_3 _ Factor de ajuste que depende de la relación entre los buzamientos de las discontinuidades y el del talud

F_4 _ Factor de excavación que depende del método utilizado para excavar el talud (tabla 10)

En la tabla 11 se muestra la descripción del SMR y en la tabla 12 los lineamientos de soporte del talud de acuerdo a su valor.

Tabla 9. Parámetros de corrección para SMR

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 10. Valores correspondientes al factor F₄

Método de excavación (F ₄)			
Talud natural	+15	Voladura o excavación mecánica	0
Precorte	+10	Voladura deficiente	-8
Voladura suave	+8		

Fuente: (Romana, 1985)
Elaborado por: El Autor

Tabla 11. Descripción de la clasificación SMR

Clases →	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Completamente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Completamente estable
Rotura	Grandes roturas por planos continuos o por masas	Planar o grandes cuñas	Algunas juntas o grandes cuñas	Algunos bloques	ninguna
Probabilidad de rotura	0.9	0.6	0.4	0.2	0

Fuente: (Romana, 1985)
 Elaborado por: El Autor

Tabla 12. Lineamientos de soporte del talud basados en SMR

SMR→	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
Re -excavación			Re-excavación Muros													
Drenaje			Drenaje superficial Drenaje profundo													
Concreto			Concreto lanzado Concreto de relleno Contrafuertes y/o vigas Muros de pie													
Reforzamiento						Bulones Anclajes										
Protección							Zanjas de pie Vallas de pie o de talud Redes									
Sin soporte											Saneamiento					

Fuente: (Romana, 1985)
 Elaborado por: El Autor

Para la representación del SMR en un SIG, se sigue la metodología de Irigaray et al. (2001; 2003) y Tomas et al. (2009), que será extendida más adelante en el capítulo metodología.

2.4. Análisis cinemático

El macizo rocoso en taludes puede presentar roturas a causa de sus discontinuidades, en las siguientes condiciones: rotura planar, rotura en cuña y rotura por vuelco; para realizar el análisis cinemático es necesario realizar la representación gráfica de la dirección y buzamiento de las estructuras presentes en el talud. El análisis por separado de la dirección

y buzamiento de las discontinuidades no resulta muy satisfactorio, por ello las proyecciones estereográficas proporcionan una manera fácil de realizarlo (Lisle & Lesion, 2004), analizando tridimensionalmente estos dos aspectos, es decir analizando estructuras tridimensionales en el plano.

La red estereográfica es la representación de una esfera en el plano, proceso en el cual en dependencia del tipo de representación, se pierde información; así, si mantenemos los ángulos correctos (Equiangular) se distorsionan las distancias y si mantenemos las distancias (Equidistancial) se distorsionan los ángulos. La red de SCHMIDT (Fig. 10) es una proyección equidistancial apropiada para el análisis en geología estructural, dado que el mismo se pueden manejar gran cantidad de datos (nube de datos), manteniendo su geometría.

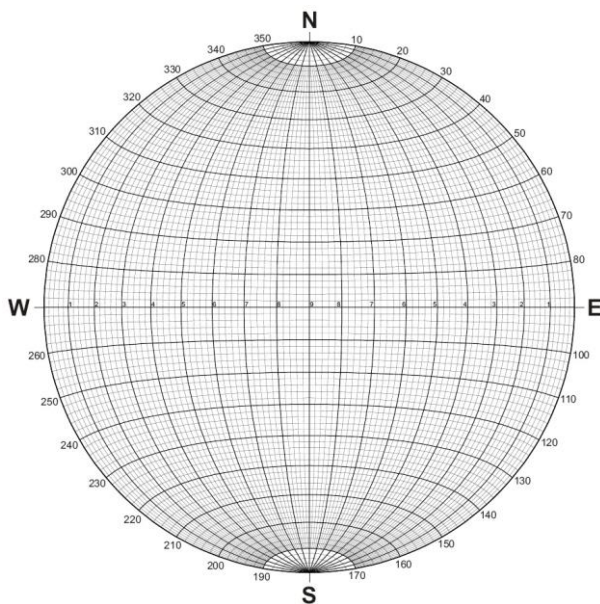


Figura 10. Red estereográfica de SCHMIDT

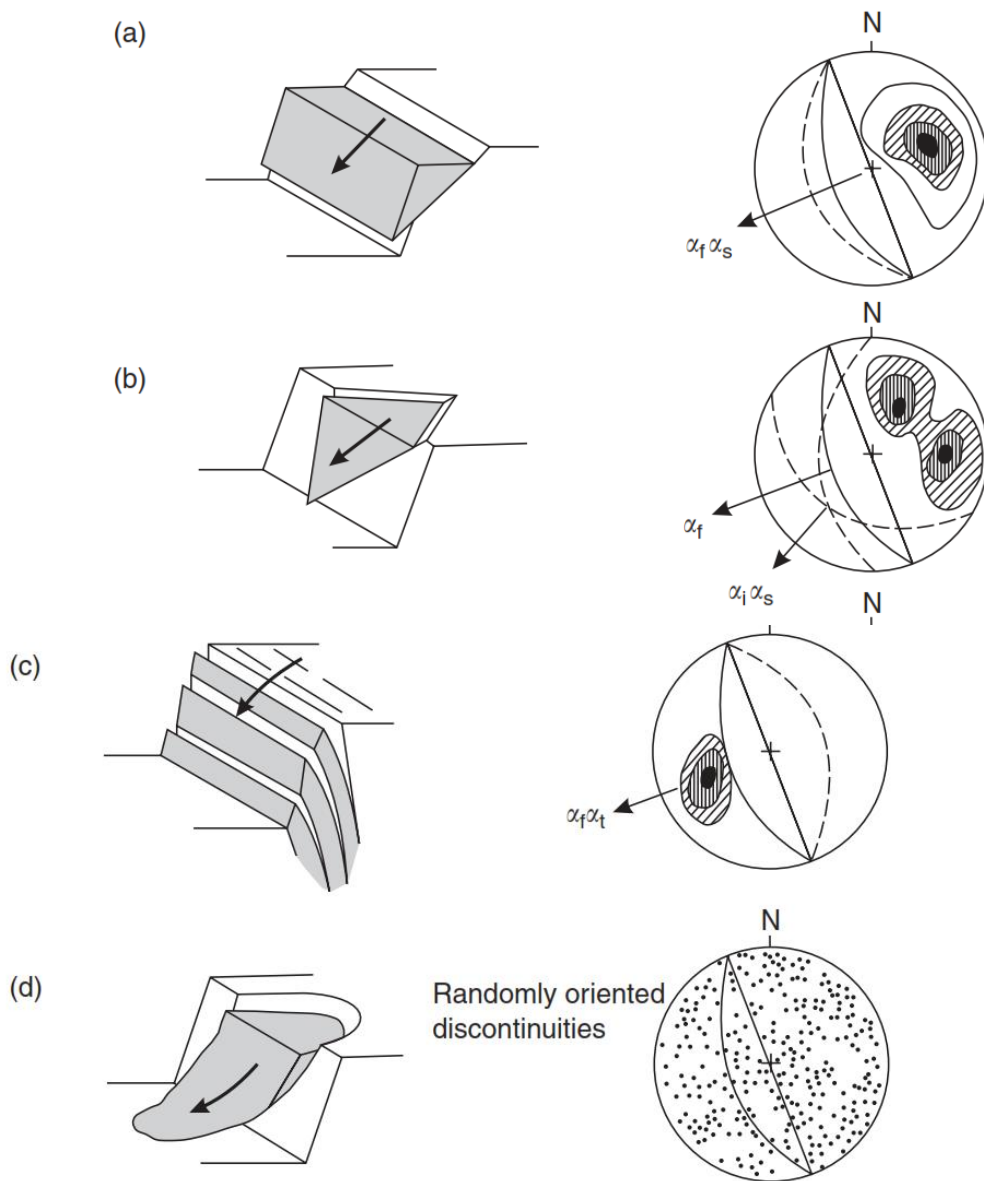
Fuente: (Adler, 1982)

Elaborado por: El Autor

En la figura 11, se muestran los principales tipos de roturas de bloque en taludes para diferentes condiciones de geología estructural que pueden causar estos fallos, representados en redes estereográficas (Wyllie & Mah, 2007):

- (A) Rotura planar en talud dado por una familia de discontinuidades
- (B) Rotura en cuña dado por dos familias de discontinuidades
- (C) Rotura por volcamiento dado por una familia de discontinuidades

(D) fallo circular en el relleno de roca, muy débil Roca o roca estrechamente fracturada con Discontinuidades orientadas aleatoriamente



Legend	
Pole concentrations	α_f dip direction of face
Great circle representing face	α_s direction of sliding face
Great circle representing plane corresponding to centers of pole concentrations	α_t direction of toppling
	α_i dip direction, line of intersection

Figura 11. Principales tipos de roturas de bloque en taludes para diferentes condiciones de geología estructural que pueden causar estos fallos

Fuente: (Wyllie & Mah, 2007)

Elaborado por: El Autor

El análisis cinemático consiste en evaluar si los bloques formados por las diferentes familias de discontinuidades superan la resistencia al cizallamiento en dichos planos, en el caso que esta fuerza de cizalla solo comprende la fricción y la cohesión es cero, estamos hablando del concepto de cono de fricción, en el cual, la condición de reposo es cuando el vector fuerza normal al plano está dentro de dicho cono (Fig. 12). Esta condición para los distintos tipos de rotura, pueden ser evaluadas mediante redes estereográficas (Turner & Schuster, 1996):

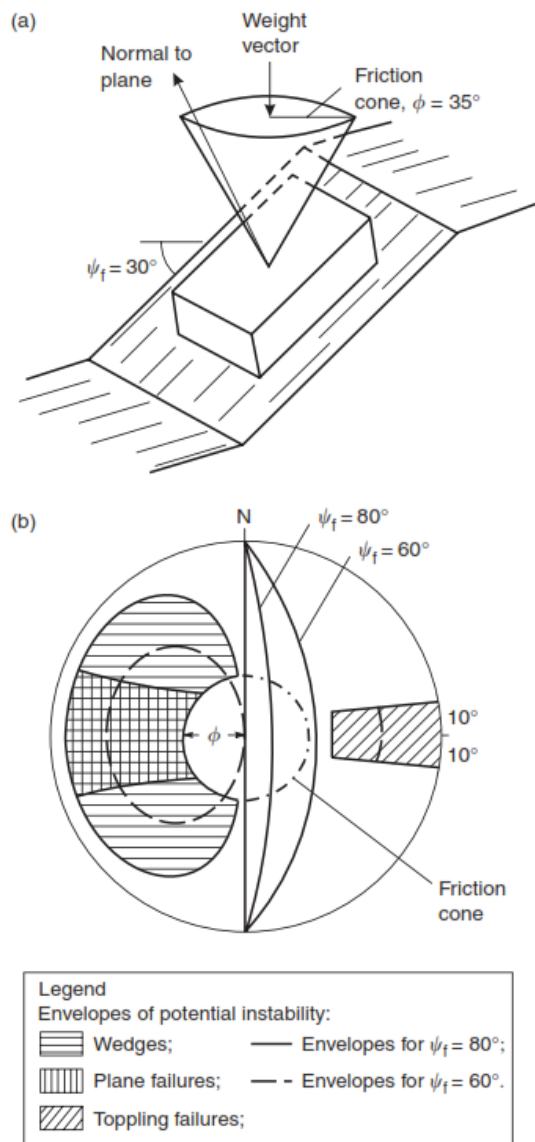


Figura 12. Combinación de análisis cinemático y análisis de estabilidad simple usando el concepto de cono de fricción: (a) cono de fricción en relación con el bloque en reposo en un plano inclinado (es decir); Y (b) proyección estereográfica del cono de fricción superpuesto en las "proyecciones" de las envolventes.

Fuente: (Wyllie & Mah, 2007)
Elaborado por: El Autor

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

3.1. Análisis geológico

Como base para la clasificación geomecánica, dentro del componente análisis geológico, de acuerdo a la sistemática seguida (González de Vallejo et al. ,2002) se realizó el levantamiento topográfico a detalle mediante la metodología de estación total y GPS diferencial de alta precisión RTK (Real Time Kinematic). El trabajo consiste en una faja topográfica de 1.2 Km de longitud aproximadamente, que es la longitud del afloramiento rocoso, con un ancho tal que pueda definir las características geométricas de muestra carretera (en nuestro caso 60m) en la cual se tomó especial cuidado al levantamiento de los taludes, definiendo el relieve del sector, ubicación de obras de arte y demás características naturales y artificiales, propias de las obras viales.

Con base en el levantamiento topográfico y geológico del área de estudio, se definen las zonas litoestructurales a ser analizadas, las zonas litoestructurales tienen características similares en cuanto al tipo de roca y grado de fracturamiento, y sirven para planificar la campaña de toma de datos de campo y muestreo de rocas a ensayarse en laboratorio. Las zonas litoestructurales se discretizaron en estaciones de toma de datos cada 10m de longitud, dado que los datos serán la base para el manejo de información en GIS.

3.2. Obtención de datos geomecánicos

Para la obtención de los datos geomecánicos, una vez definidas las zonas litoestructurales y planificadas las estaciones de muestreo, se define la metodología de línea de escaneo, con recolección continua de medidas de: separación, longitud, apertura, rugosidad, meteorización, infiltración y relleno de las discontinuidades, además, todos los datos estructurales que se puedan recolectar. La testificación se realiza en cada zona litoestructural.

La metodología para la obtención de datos geomecánicos se basa en el uso de fichas. En la figura 13 y 14 se observan respectivamente las fichas de zonificación (base para el análisis geológico) y de caracterización del macizo rocoso (base para la obtención de datos geomecánicas). Estas fichas fueron tomadas de González de Vallejo et al. (2002) y modificadas por el autor para recolectar toda la información necesaria en este trabajo en especial.

PROYECTO: _____		ESTACIÓN: _____		HOJA/PLANO: _____					
REALIZADO POR: _____		LOCALIZACIÓN: _____		FOTO: _____					
FECHA: _____									
LITOLOGÍA	NATURALEZA:			POTENCIA:	FORMACIÓN Y EDAD:				
FORMACIONES SUPERFICIALES	NATURALEZA Y TEXTURA:			MORFOLOGÍA:	ESPESOR:				
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 (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:
CROQUIS N° 1					OBSERVACIONES				

Figura 13. Ficha de zonificación

Fuente: (González de Vallejo et al. 2002)

Elaborado por: El Autor

Las labores de toma y relleno de datos geomecánicos, se realizaron en una campaña de 15 días (Fig. 15). Donde se caracterizó a detalle cada una de las zonas litoestructurales.



Figura 15. Campaña de Relleno de datos. A la izquierda ejecución de medidas de rugosidad con peine de Barton, a la derecha ejecución de ensayo esclerométrico de bajo impacto.

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

De cada zona litoestructural, se obtuvieron muestras de rocas por medio de un muestreador de núcleos con corona de diamante de 2.5" de diámetro exterior. Las muestras fueron codificadas y trasladadas a laboratorio. (Fig. 16)

Con los núcleos de roca obtenidos en laboratorio se realizaron los siguientes ensayos (Fig. 19, 21 y 23): Densidad, valor de rebote al martillo de Schmidt tipo L, ángulo de fricción básico y resistencia a la compresión simple.

Previo al ensaye de las muestras, estas fueron preparadas siguiendo el siguiente procedimiento: 1. Corte y Perfilado, 2. Pulido de los testigos, 3. Secado y recodificación y 4. Ensaye de muestras.



Figura 16. Campaña de Testificación. A la izquierda ejecución de la labor de perforación, a la derecha personal de campo junto al total de muestras extraídas

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

Para el caso de las medidas de rugosidad, además de la apreciación visual a través de perfiles típicos (Fig. 5 y 6), se sigue la metodología de Barton & Bandis (1990), considerándose el efecto de escala y calculándose en forma cuantitativa el valor de la rugosidad JRC_n , para lo cual se mide la profundidad de la aspereza de la discontinuidad, en función del tamaño del bloque (Fig. 17), donde n es la longitud del perfil medido, en la figura 18 se muestra el diagrama de cálculo de JRC_n en función de la amplitud de la aspereza y la longitud del perfil medido.

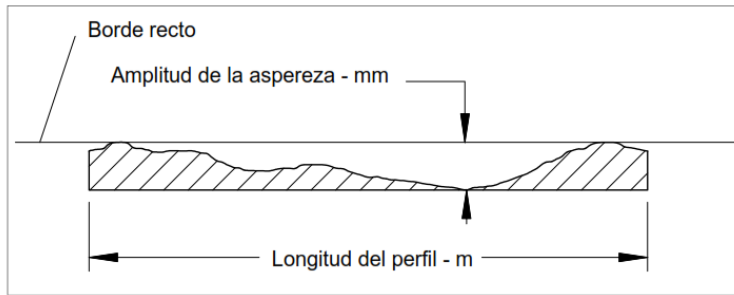


Fig. 17. Medida de amplitud y longitud de la aspereza de la junta

Fuente: (Barton & Bandis, 1990)

Elaborado por: El Autor

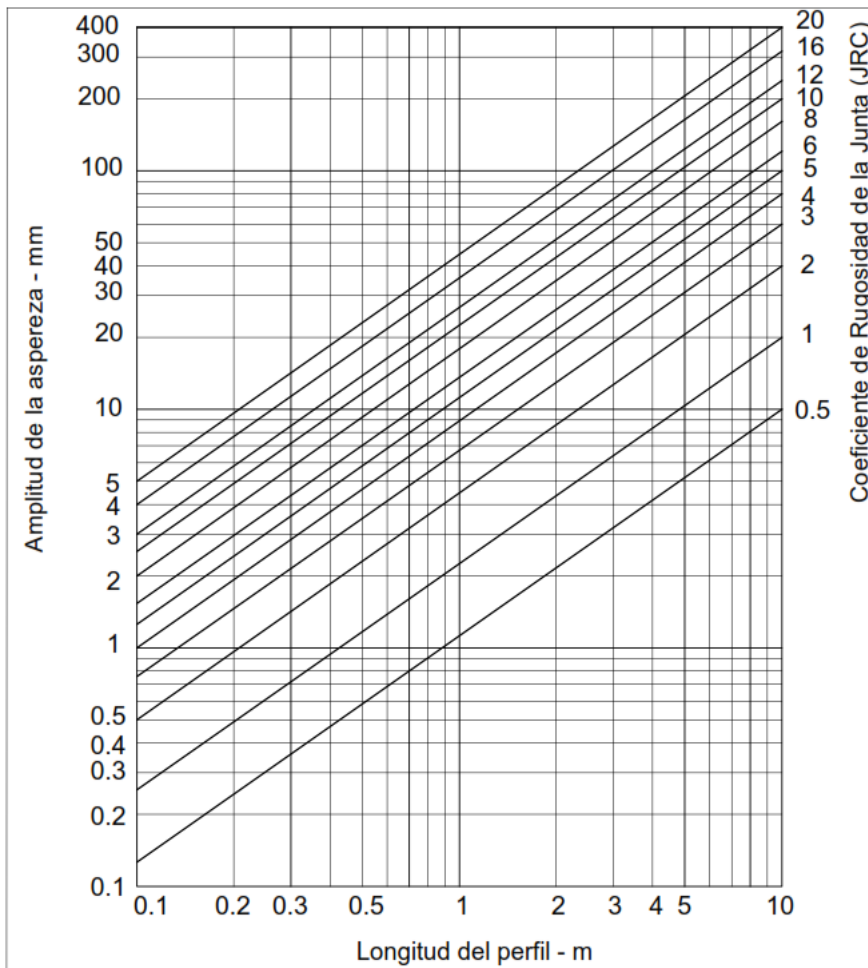


Figura 18. Gráfico para determinar el JRC en función de la amplitud y longitud de la discontinuidad

Fuente: (Barton & Bandis, 1990)

Elaborado por: El Autor

La ejecución del ensayo de compresión simple sigue la normativa ASTM D3938, con rotura de testigos de 5cm de diámetro por 10cm de altura, de los cuales previamente se obtuvieron datos de densidad. En la figura 19 se muestra la ejecución de uno de los ensayos de compresión simple.



Figura 19. Ensayo de resistencia a la compresión simple en núcleo de zona litoestructural número 6.

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

La metodología para el cálculo de la resistencia a la compresión simple cuando se trata de la matriz rocosa (JCS) se obtiene generalmente por ensayos de compresión simple en laboratorio o por ensayo carga puntual; pero en el caso de las discontinuidades, no podemos realizar estos ensayos mecánicos, debiendo utilizarse métodos indirectos como el índice de rebote del martillo de Schmidt de bajo impacto (o tipo L). La figura 20, 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:

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

Donde: σ_c _ esfuerzo a la compresión simple de la superficie (MN/m²)

γ _ densidad seca de la roca (KN/m³)

R _ índice de rebote en posición vertical

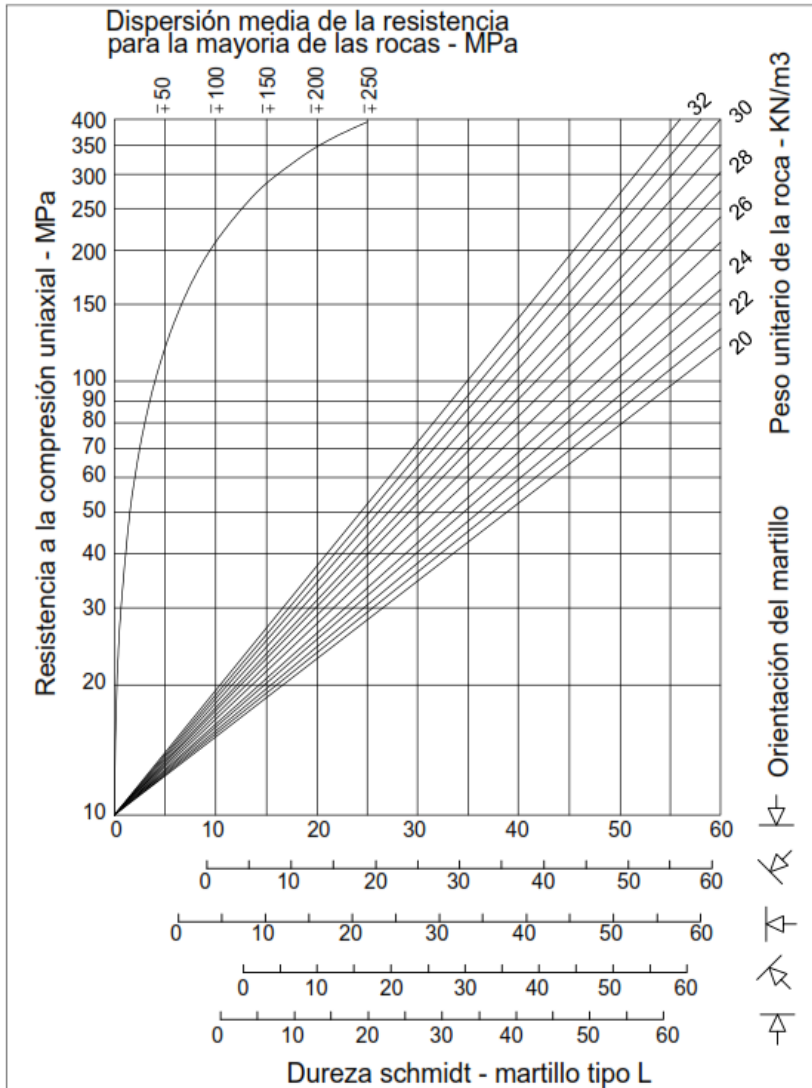


Figura 20. Valores típicos de resistencia para la mayoría de las rocas, en función del índice de rebote y su densidad

Fuente: (Deere & Miller, 1966)
Elaborado por: El Autor

Por conveniencia de símbolos se utiliza "R" cuando se el índice de rebote se ha obtenido sobre una roca inalterada y "r" cuando se ha obtenido sobre la superficie de una discontinuidad, el valor de la compresión simple obtenido representa el JCS. En la figura 21 se muestra la ejecución del ensayo de medición del valor de rebote R.

El índice de rebote debe ser corregido por orientación del martillo de acuerdo a la tabla 13.

Tabla 13. 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: El Autor



Figura 21. Medición del valor de rebote con martillo Schmidt de bajo impacto

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

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 siguiente expresión (Barton & Choubey, 1977):

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

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.

Para el caso específico del ángulo de fricción básico de la roca, el ensayo Tilt Test es el ideal. La metodología seguida es la recomendada por Stimpson (1981), el cual ha definido la siguiente expresión para encontrar el ángulo de fricción básico utilizando tres testigos de roca (Fig. 22):

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

Donde: α _ ángulo medido en ensayo Tilt Test

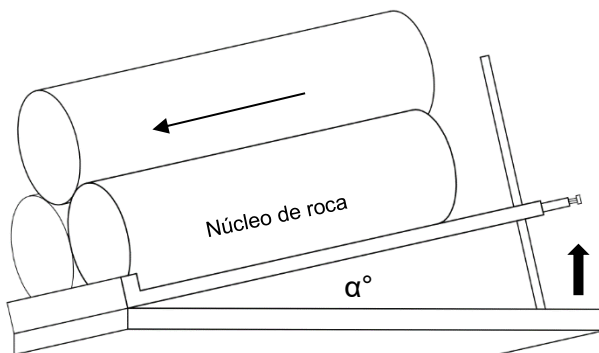


Figura 22. Esquema ensayo Tilt Test en núcleos de roca

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

En la figura 23, se muestra la ejecución del ensayo Tilt Test para definir el ángulo de fricción básico de las rocas de la matriz rocosa.

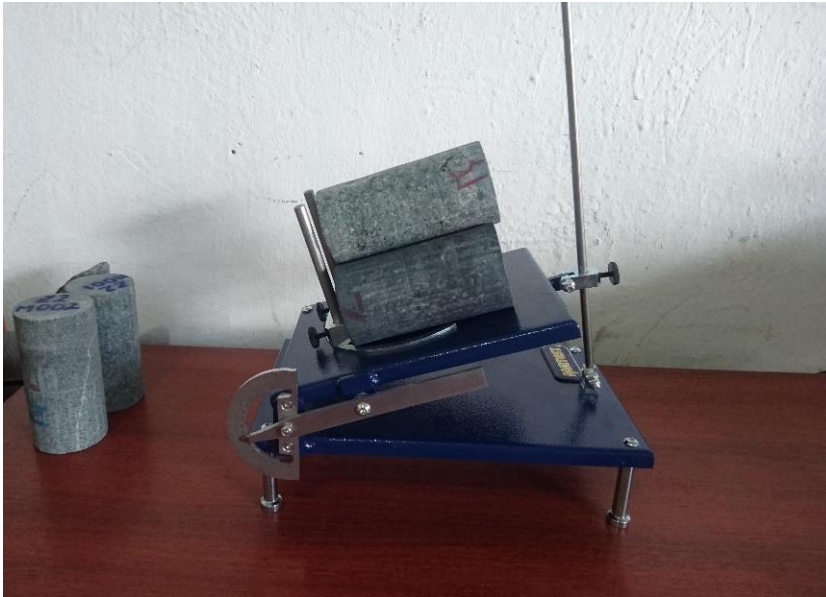


Figura 23. Ejecución de ensayo Tilt Test

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

3.3. Clasificación geomecánica RMR.

Como base para la clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989), se calcula previamente el índice RQD del inglés Rock Quality Designation (Deere, 1989), este generalmente se calcula de la recuperación de testigos de roca de diámetro mayores a 54.7mm, sin embargo en nuestro caso se utilizará la metodología del índice volumétrico de fracturas J_v (Palmstrom, 2005), en los rangos de RQD 4 a 44.

$$RQD = 110 - 2.5J_v$$

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

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

Donde: J_v Índice volumétrico de fisuras por cada m^3

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

SM_i Espaciamiento medio de cada fisura en m

El método de cálculo del RMR, es a través de la automatización por el uso de funciones continuas de sus parámetros y siguiendo las recomendaciones de Bieniawski (2011) para evitar errores en la clasificación geomecánica.

3.4. Clasificación geomecánica SMR mediante herramientas de SIG

El SMR calculado a través de herramientas de SIG, necesita funciones continuas para su automatización, muchos autores durante los últimos 30 años han modificado o adaptado el SMR a estas necesidades, modificando la metodología original de valores discretos (Manuel Romana, Tomas, & Seron, 2015); Tomás et al. (2007) propusieron funciones continuas asintóticas para los factores de corrección F1, F2 y F3 (Tabla 14); reduciendo la interpretación subjetiva y con aplicación práctica en rutinas informáticas y en SIG.

Tabla 14. Funciones continuas para F1, F2 y F3. A: paralelismo entre la discontinuidad y dirección de la superficie del talud; B: buzamiento de la discontinuidad β_j ; 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: El Autor

Para el cálculo se ha utilizado la metodología propuesta por varios autores Irigaray et al. (2001; 2003) y Tomas et al., (2009), este empieza con la generación de variables primarias: MDT (a partir de la topográfico), Sectores (en nuestro caso estaciones), RMR básico, Dirección de Buzamiento de cada familia de discontinuidades, Buzamiento de cada familia de discontinuidades y factor de excavación “F4” (Tabla 15), las cuales son variables de tipo vectorial, que luego se convierten a formato a raster para luego calcular las variables secundarias: A, F1, F2, C, F3, F4 (para cada tipo de rotura), Slope y Aspect, (Tabla 16).

Tabla 15. Propiedades de las variables de entrada del SIG (variables primarias),

Inputs	Formato	Información que contiene
MDT (x,y)	Vectorial (ASCII)	x,y,z
Sectores	Vectorial - polígono	Sectores de estudio diferenciados
RMR básico	Vectorial - polígono	RMR básico de cada sector de estudio diferenciado (y opcionalmente para cada discontinuidad "i").
Dirección buzamiento _i	Vectorial - polígono	Dirección de buzamiento de cada sistema de discontinuidad "i" en cada sector
Buzamiento _i	Vectorial - polígono	Buzamiento de cada discontinuidad "i" en cada sector
F ₄	Vectorial - polígono	Método de excavación de los taludes de cada sector

Fuente: (Tomas et al., 2009)

Elaborado por: (Tomas et al., 2009)

Tabla 16. Propiedades de las variables secundarias del SIG

Inputs	Formato	Información que contiene
A _i (x,y)	<i>Ráster</i>	Paralelismo entre la dirección de las discontinuidades
F _{1i} (x,y)	<i>Ráster</i>	Parámetro derivado del paralelismo entre la dirección de las discontinuidades
F _{2i} (x,y)	<i>Ráster</i>	Parámetro derivado del buzamiento de la discontinuidad
C _i (x,y)	<i>Ráster</i>	Relación de buzamientos
F _{3i} (x,y)	<i>Ráster</i>	Parámetro derivado de la relación de buzamientos
F ₄ (x,y)	<i>Ráster</i>	Parámetro dependiente del método de excavación
Slope (x,y)	<i>Ráster</i>	Ángulo de pendiente (pendiente o ángulo con la horizontal).
Aspect (x,y)	<i>Ráster</i>	Dirección de aspecto (dirección de la línea de máxima pendiente)
TR _i (x,y)	<i>Ráster</i>	Tipo de rotura

Fuente: (Tomas et al., 2009)

Elaborado por: (Tomas et al., 2009)

La orientación de las familias de las discontinuidades y cuñas se analizó por medio del uso de redes estereográficas y el software Dips 6.0 (ROCSCIENCE, 2013), los datos estructurales resultantes se digitalizaron en un SIG para cada una de las familias de discontinuidades o de posibles cuñas en formato vector, separando los valores de buzamiento y dirección de buzamiento, para luego ser convertidos a formato raster. Del procesamiento mediante herramientas de SIG de la topografía se obtiene el Modelo Digital del Terreno (MDT), y del procesamiento de este se obtiene la orientación del talud, esta variable secundaria se separa en Slope o Pendiente del talud, y Aspect o dirección de la línea de máxima pendiente talud.

En el proceso de cálculo, se utilizó con un tamaño de pixel de 0.5x0.5m y con un número máximo de 5 familias de discontinuidades y 6 de cuñas más probables, también incluye el relleno de datos vacíos para el cálculo del valor mínimo para cada tipo de rotura, considerando que las variables raster tienen que tener el mismo tamaño para su evaluación. El cálculo termina por medio de la aplicación de las funciones continuas de cálculo del SMR, el cual se esquematiza en la figura 24, considerando un factor F4 por método de excavación igual a cero, que correspondiente a voladura o excavación mecánica.

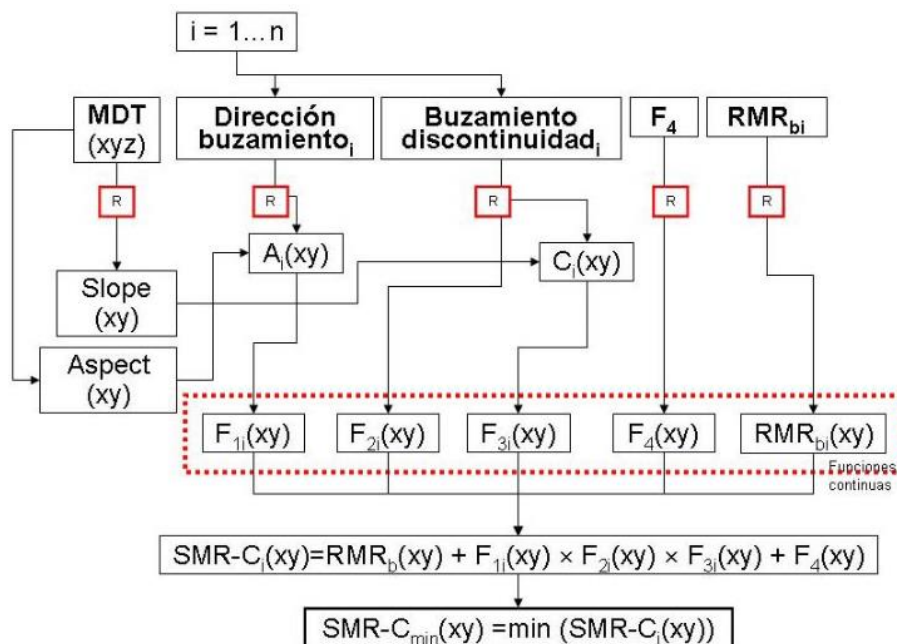


Figura 24. Esquema del cálculo del SMR continuo mediante herramientas de SIG

Fuente: (Tomas et al., 2009)

Elaborado por: (Tomas et al., 2009)

Siguiendo la metodología de cálculo de SMR mediante herramientas de SIG, se obtienen mapas de susceptibilidad a la rotura planar, en cuña y por vuelco; que representan el valor de SMR de la familia de discontinuidad o cuña más susceptible a la rotura,

El cálculo del SMR, se realiza para cada familia “i” de discontinuidades (SMR_{i p}, SMR_{i c} y SMR_{i v}) y para cada tipo de rotura (planar “p”, cuña “c” y vuelco “v”) de cada estación, donde se obtienen los factores de corrección (F_{1i p}, F_{2i p}, F_{3i p}, F_{1i c}, F_{2i c}, F_{3i c}, F_{1i v}, F_{2i v} y F_{3i v}) resultantes de las ecuaciones continuas; de forma que:

$$SMR_{ip} = RMR_i + (F_{1ip} * F_{2ip} * F_{3ip}) + F_4 \text{ ó } SMR_{ip} = RMR_i + (F_{1ip} * F_{2ip} * F_{3ip}) + 0$$

$$SMR_{ic} = RMR_i + (F_{1ic} * F_{2ic} * F_{3ic}) + F_4 \text{ ó } SMR_{ic} = RMR_i + (F_{1ic} * F_{2ic} * F_{3ic}) + 0$$

$$SMR_{iv} = RMR_i + (F_{1iv} * F_{2iv} * F_{3iv}) + F_4 \text{ ó } SMR_{iv} = RMR_i + (F_{1iv} * F_{2iv} * F_{3iv}) + 0$$

Para la obtención del mapa de susceptibilidad a la rotura planar, se extrae el valor de SMR mínimo de entre todas las familias identificadas en cada estación; siendo el mismo procedimiento para rotura en cuña y por vuelco.

$$SMR_p = \text{Min} (SMR_{1p}, SMR_{2p}, SMR_{3p}, SMR_{4p}, SMR_{5p})$$

$$SMR_c = \text{Min} (SMR_{1c}, SMR_{2c}, SMR_{3c}, SMR_{4c}, SMR_{5c})$$

$$SMR_v = \text{Min} (SMR_{1v}, SMR_{2v}, SMR_{3v}, SMR_{4v}, SMR_{5v}, SMR_{6v})$$

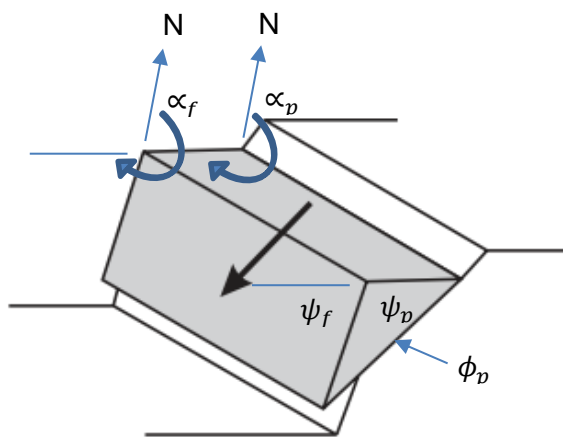
3.5. Análisis cinemático

Los puntos susceptibles al deslizamiento definidos mediante el sistema SMR, se evalúan a la rotura planar, en cuña y en vuelco, de acuerdo a la metodología de Wyllie & Mah (2007), mediante el uso de redes estereográficas, utilizando los valores de orientación del plano del talud, orientación del plano de las discontinuidades, ángulo de fricción del plano de las discontinuidades (criterio del cono de fricción) y condiciones de límites.

3.5.1. Condiciones estructurales para rotura plana.

Las condiciones para rotura planar son (fig. 25):

1. El rumbo de la discontinuidad planar debe estar 20 grados dentro del rumbo de la cara del talud en ambas direcciones: $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$
2. El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el buzamiento de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara: $\psi_p < \psi_f$
3. El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento: $\psi_p > \phi_p$



Condiciones para rotura planar:

1. $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$
2. $\psi_p < \psi_f$
3. $\psi_p > \phi_p$.

Legenda:

- α_p = dirección de inclinación del plano
 α_f = dirección de inclinación del talud
 ψ_p = buzamiento del plano
 ψ_f = buzamiento del talud
 ϕ_p = ángulo de fricción del plano

Figura 25. Condiciones estructurales para rotura planar

Fuente: (Wyllie & Mah, 2007)

Elaborado por: El Autor

3.5.2. Condiciones estructurales para rotura en cuña.

Las condiciones para rotura en cuña son (fig. 26):

1. El rumbo de la cuña debe estar 20 grados dentro del rumbo de la cara del talud en ambas direcciones: $\alpha_i = \alpha_f \pm 20^\circ$
2. El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el buzamiento de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara: $\psi_i < \psi_f$
3. El ángulo de fricción debe ser menor que el buzamiento de la intersección: $\phi < \psi_i$

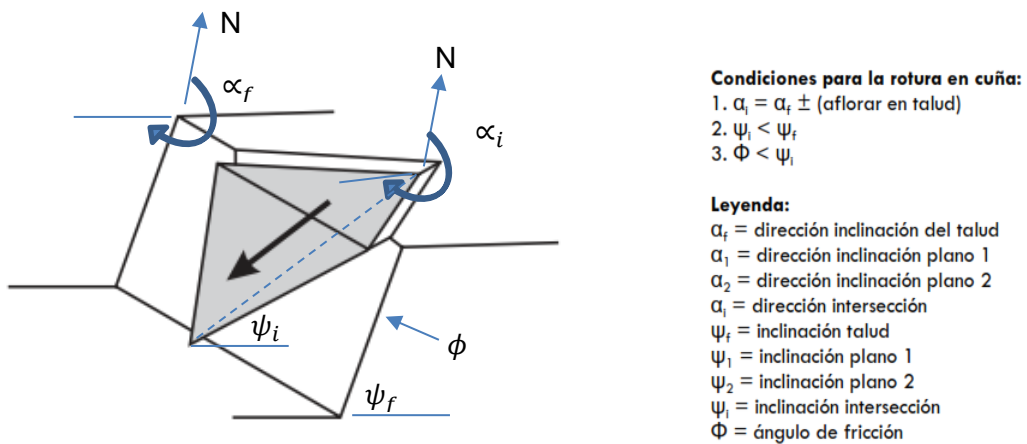


Figura 26. Condiciones estructurales para rotura en cuña

Fuente: (Wyllie & Mah, 2007)
Elaborado por: El Autor

3.5.3. Condiciones estructurales para rotura por vuelco.

Las condiciones para rotura en cuña son (fig. 27):

1. El plano de rotura debe tener un rumbo aproximadamente paralelo ($\pm 20^\circ$) con relación al plano del talud : $\alpha_i = (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 20^\circ$
2. El ángulo de inclinación del plano con respecto a la vertical, debe ser menor al ángulo de buzamiento del talud menor el ángulo de fricción : $(90 - \psi_p)(\psi_f < \phi_p)$

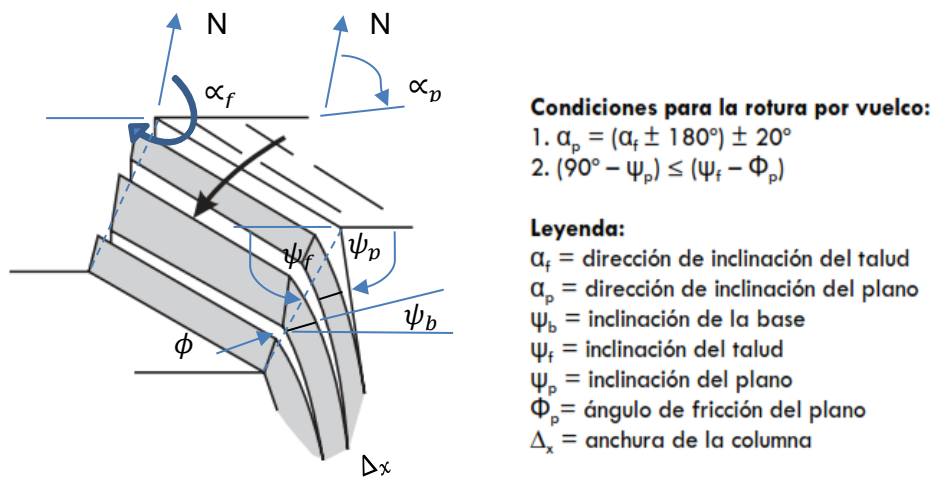


Figura 27. Condiciones estructurales para rotura en por vuelco

Fuente: (Wyllie & Mah, 2007)
Elaborado por: El Autor

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Análisis geológico

De la fase de análisis geológico, se obtuvo el levantamiento topográfico base (Fig. 28), sobre el cual se realizó la zonificación litoestructural, esta zonificación dio como resultados 8 zonas a ser analizadas (tabla 17), de las cuales se caracteriza el tramo de la abs 27+500 a 27+530 correspondiente a la zona 1 y las abs 28+760 a 28+860 correspondientes a la zona 8, las cuales corresponde a un saprolito de la roca original, que poseen un diaclasamiento caótica y con relleno arcilloso y por lo cual no se caracterizarán en el presente trabajo, por no ser aplicables al SMR.

Tabla 17. Descripción de las zonas litoestructurales

ZONA / ABSCISA	DESCRIPCIÓN
1 / 27+500 a 27+550	27+500 a 27+530 Saprolito andesítico 27+530 a 27+550 Toba andesítica de grano fino muy fracturada
2 / 27+550 A 27+740	Toba andesítica muy fracturada
3 / 27+740 A 27+820	Andesita muy fracturada
4 / 27+820 A 28+050	Intercalaciones de andesita y toba andesítica muy fracturada
5 / 28+050 A 28+600	Andesita y andesito basalto fracturada
6 / 28+600 A 28+670	Toba andesítica muy fracturada
7 / 28+670 A 28+760	Intercalaciones de andesita y toba andesítica muy fracturada
8 / 28+760 A 28+860	Saprolito andesítico

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

En la figura 29 se muestra la zonificación litoestructural sobrepuesta sobre el mapa topográfico, en el cual sobresale la zona 5 por ser la de mayor extensión. Estas zonas se definieron en campo y fueron plasmadas en las fichas correspondientes para este fin. En Anexo 1 se muestra un ejemplo de relleno de ficha.

4.2. Obtención de datos geomecánicos

En la tabla 18, se resumen los resultados de laboratorio del ensaye de muestras de la zona 2 a 7, aclarando que las zonas 1 y 8 no fueron muestreadas por su alto grado de fracturamiento y toman el resultado de la zona más cercana.

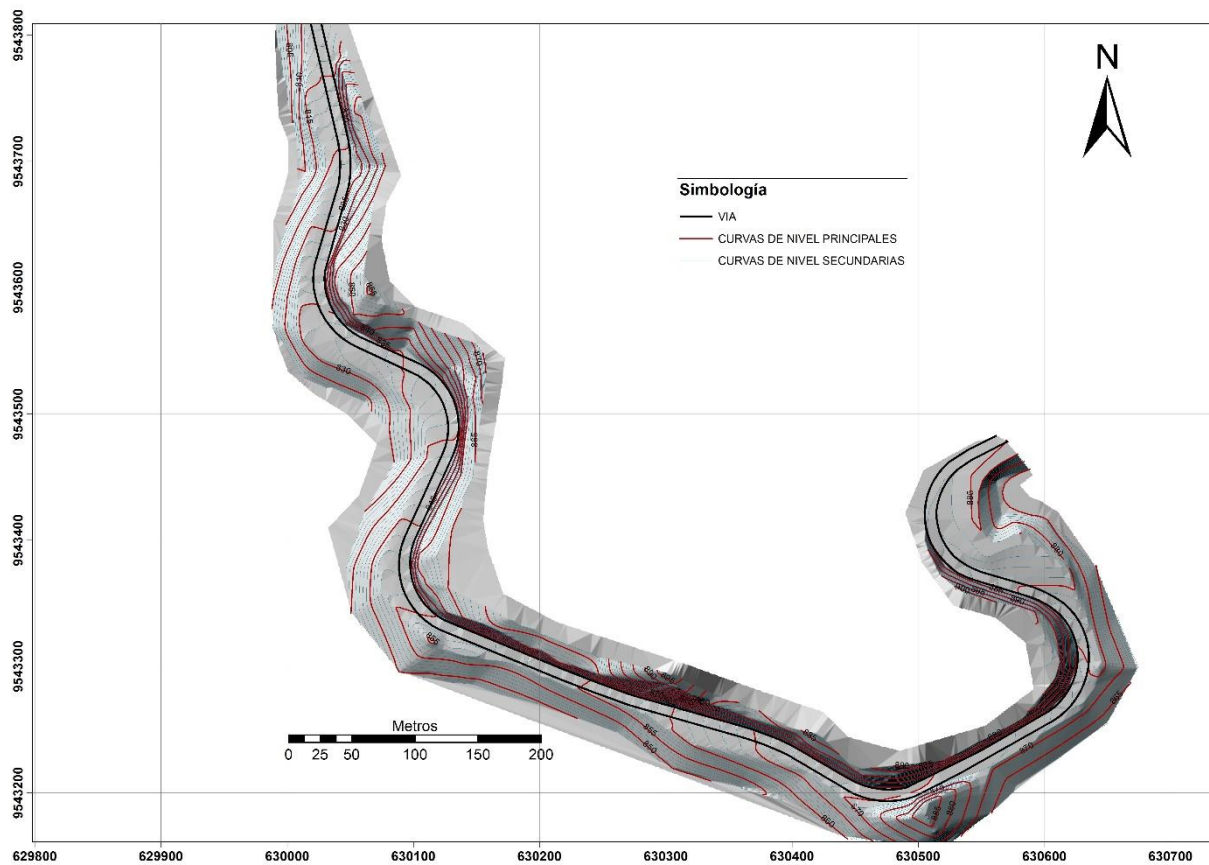


Figura 28. Topografía del tramo de estudio

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

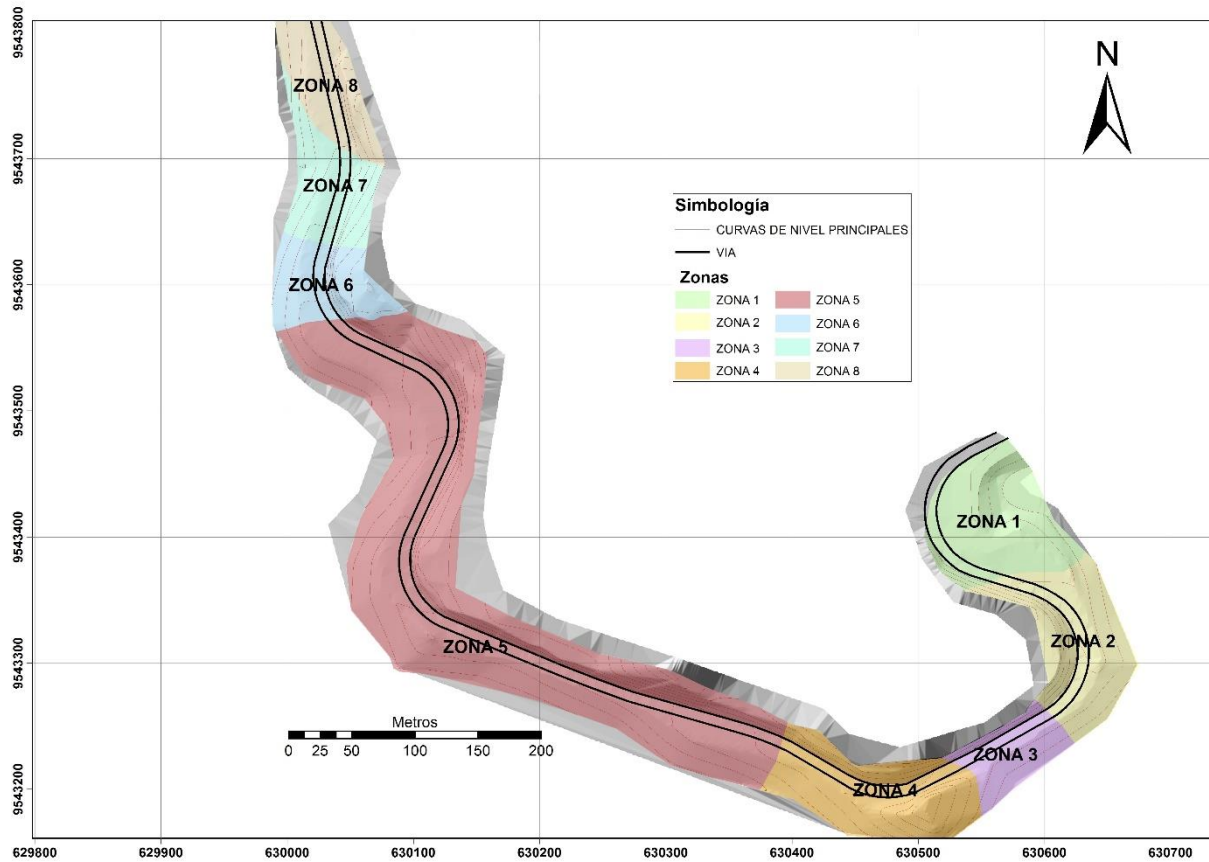


Figura 29. Zonificación litoestructural

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

Los datos geomecánicos se levantaron por medio de fichas preparadas para este fin, en Anexo 2 se muestra un ejemplo de relleno. Los datos levantados fueron luego ordenados y promediados por cada familia de discontinuidad, de lo cual se obtienen los valores de caracterización RMR. En la tabla 19 se muestra el procesamiento de datos de caracterización geomecánica para la estación 27+530 a 27+550, en la cual se han identificado 4 familias de discontinuidades, destacándose la medida de la rugosidad en términos de JRCn y de la resistencia a la compresión simple de las paredes de las discontinuidades por medio esclerómetro tipo L.

En cada zona litoestructural, se completó la caracterización geomecánica por medio del muestreo o testificación de la matriz rocosa, para su análisis. Los resultados de laboratorio (tabla 18) muestran una tendencia creciente en los valores de densidad y ángulo de fricción básico, mientras que la resistencia al rebote del martillo de Schmidt no tiene mucha variación. Los valores de resistencia a la compresión simple aparecen significativamente inferiores a los valores obtenidos por medio de esclerometría producto de la microfisuración existente en la matriz rocosa, y que en el caso especial de la zona 4 es muy notorio, en el cálculo de RMR se utiliza el valor de resistencia a la compresión simple. El valor de rebote R es característico de la matriz rocosa inalterada y se utiliza para el cálculo del ángulo de fricción residual, en comparación con los valores de rebote r obtenidos de los planos de las discontinuidades (roca alterada).

Tabla 18. Resumen de datos 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: El Autor

Elaborado por: El Autor

El valor r se utiliza además para el cálculo de la resistencia a la compresión simple de las paredes de las discontinuidades JCS. En la tabla 20 se muestra el cálculo del ángulo de fricción residual y JCS de la estación 27+530 a 27+550.

Tabla 20. Cálculo de ángulo de fricción básico y JCS de la estación 27+530 a 27+550

J	γ (KN/m ³)	r	R	Φ_b	Φ_r
J1	27.5	28	51	22	13
J2	27.5	26	51	22	12
J3	27.5	12	51	22	7
J4	27.5	27	51	22	12

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

Con la información recolectada se procesada por medio de ecuaciones continuas y se procede al cálculo del RMR (los valores se resumen el anexo 2), utilizando herramientas de GIS se calcula el RMR mínimo, cuyo resultado se muestra en la figura 31

En la figura 30 se muestra la dispersión de valores de RMR de las 118 estaciones de muestreo y para cada familia de discontinuidades, con línea continua se muestra el promedio del valor de S.M.R. en cada estación y en línea entrecortada el promedio global del Valor de RMR. En lo que respecta a las familias de discontinuidades en cada estación, 21.74% tienen 3 familias de diaclasas, 50.43% cuatro familias, 26.09% cinco familias y 1.74% seis familias de discontinuidades. El valor medio global de RMR del área de estudio es de 54.59, con un dispersión estándar de 8.11, lo que corresponde a una clasificación III o calidad Media.

Como se observa en los datos, la zona que más se alejan de la media he inclusive de la desviación estándar positiva se encuentra entre las coordenadas 27+960 a 28+170 (estación 40 a 60), con una clasificación RMR tipo II es decir Buena (media:63.03, desv: 12.65), así al separar esta zona atípica del resto de datos la media del R.M.R. del resto de estaciones tiene un valor de 52.76 con desviación estándar 5.41, mucho menor a la desviación estándar global.

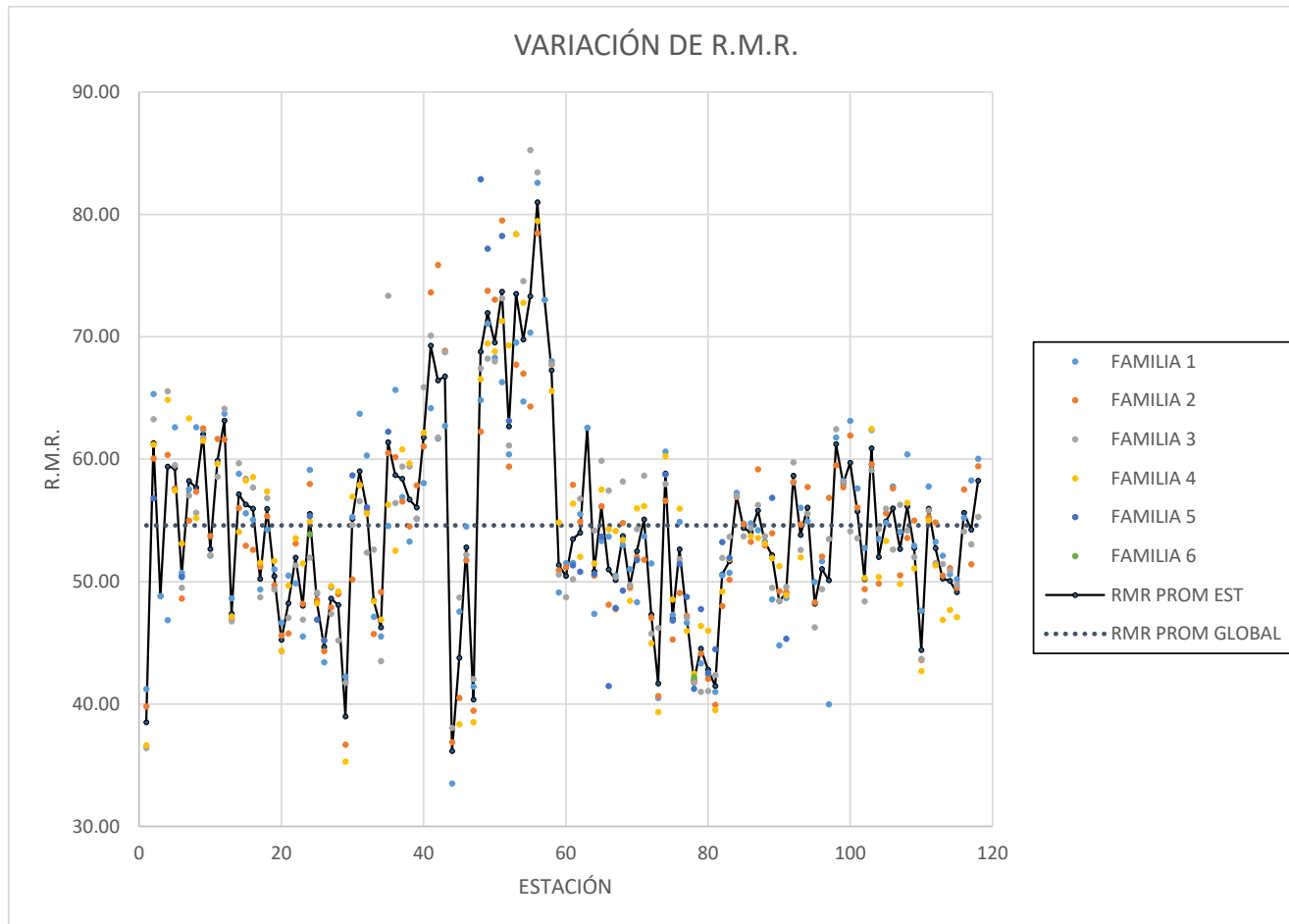


Figura 30. Análisis estadístico de resultados de R.M.R.

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

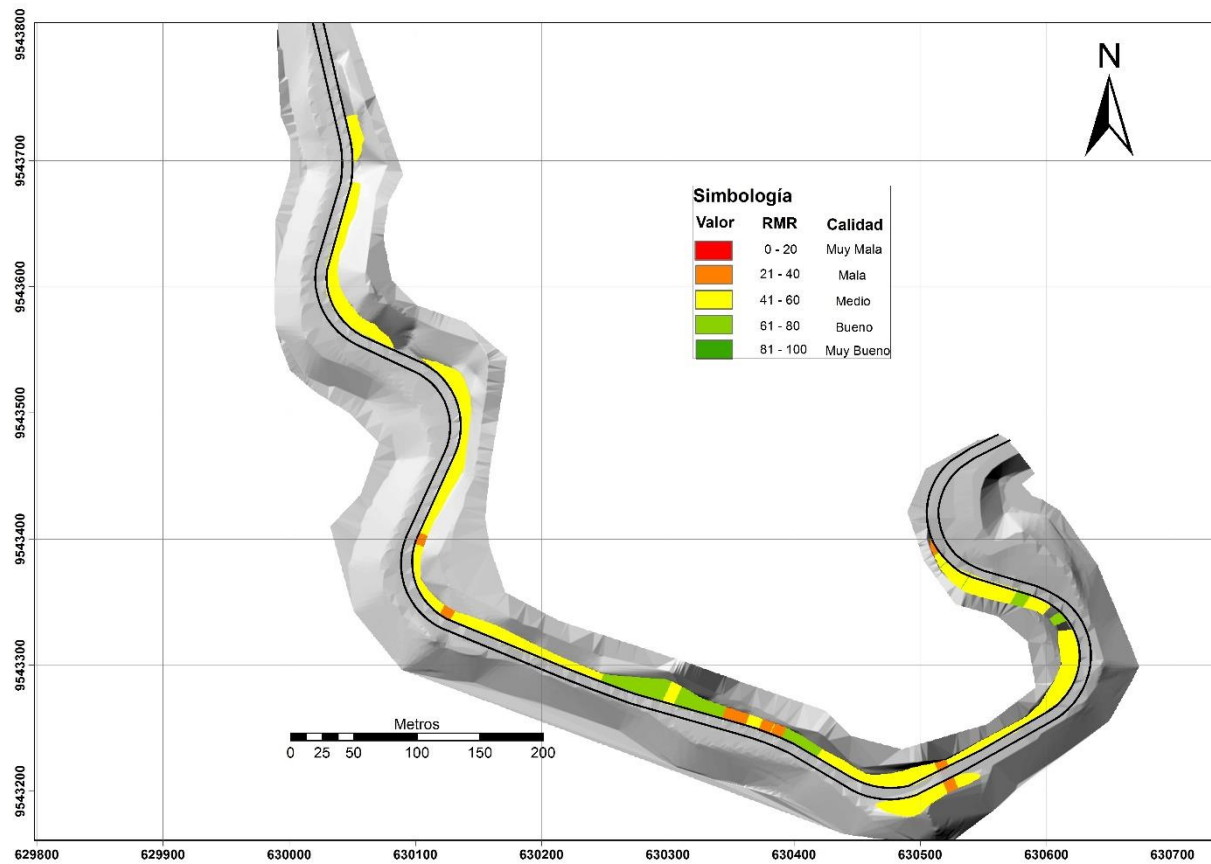


Figura 31. Mapa de clasificación R.M.R. Correspondiente a los valores mínimos

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

Pese a que se puede realizar un análisis global o por estaciones del valor de R.M.R., la orientación de sus discontinuidades y su comparación con la orientación del talud de la vía, puede cambiar totalmente el panorama (SMR), los resultados globales nos dan una idea general de las características mecánicas del talud, definiéndose así una zona central de calidad geomecánica RMR. Buena, con roca en sus flancos de calidad Media y sectores puntuales de calidad Mala (Fig. 31).

Para el análisis de la orientación de las discontinuidades se tomaron un total 1053 datos estructurales entre todas las diferentes familias reconocidas en casa estación, en la figura 32 se muestra dicha dispersión, en la cual se observa que la nube de datos tienen a agruparse alrededor de 4 orientaciones preferenciales, pero de forma difusa no siendo representativas de todo el tramo de vía.

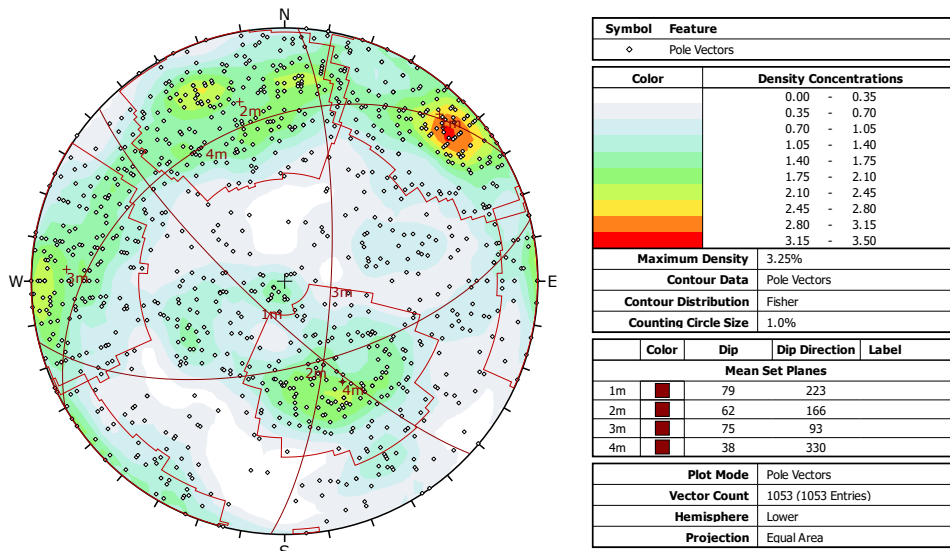


Figura 32. Dispersión de datos estructurales de las discontinuidades mostrados en Dips 6.0

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

Para el análisis del SMR, se obtuvieron familias de discontinuidades de cada estación por medio del programa Dips (Versión 6.0), las cuales se resumen en el Anexo 2, realizándose así una discretización de la zona de estudio con 470 familias de distintas. Estos datos sirvieron para calcular los factores de corrección f_1 , f_2 y f_3 para el cálculo de la susceptibilidad a la rotura planar y vuelco.

El análisis de la susceptibilidad a la rotura en cuña se calculó con las direcciones de las cuñas formadas por los planos de las familias de discontinuidades, las cuales se calcularon por medio del programa Dips (Versión 6.0). En la figura 33 y 34, se muestra un ejemplo del cálculo de las orientaciones preferenciales de las familias de discontinuidades y de sus cuñas.

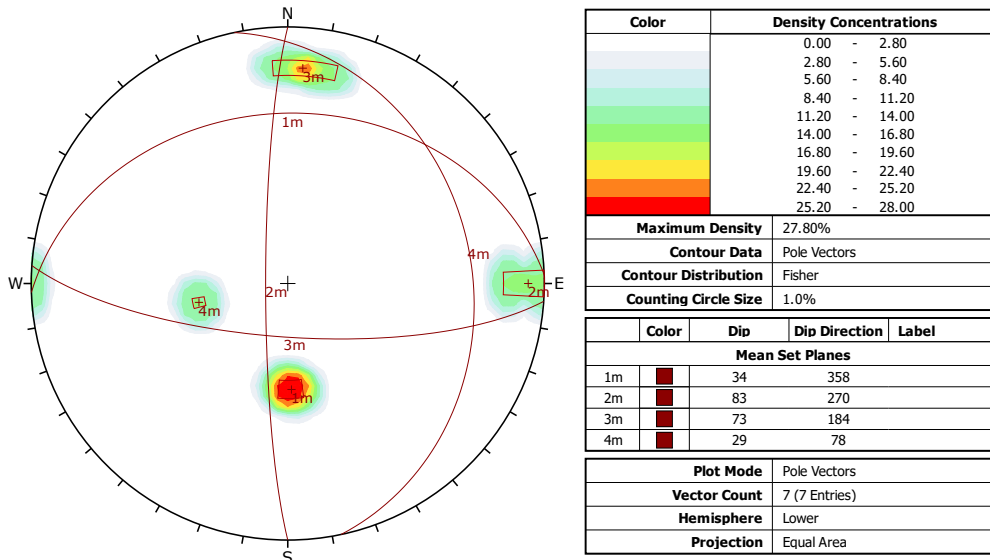


Figura 33. Cálculo de las orientaciones preferenciales por familia en Dips 6.0, km 27+620 a 27+630

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

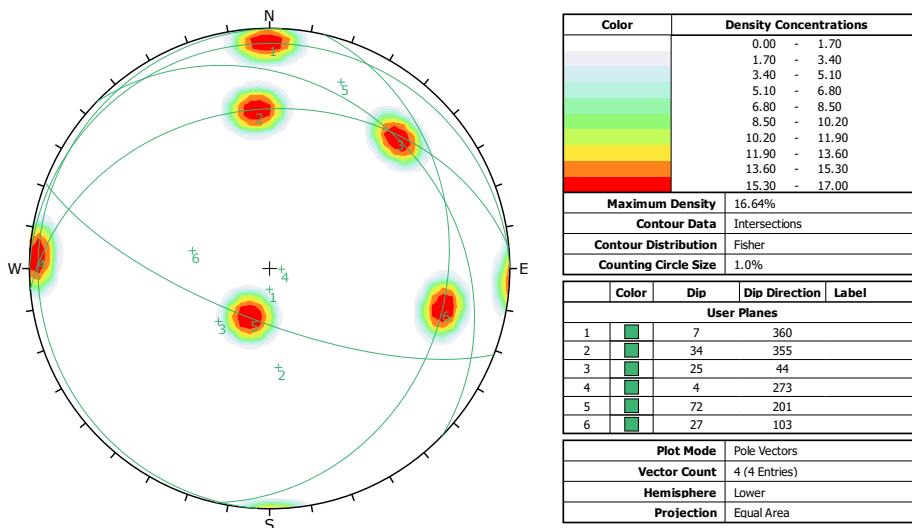


Figura 34. Cálculo de las orientaciones de las cuñas por familia en Dips 6.0, km 27+620 a 27+630

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

Finalmente por medio de herramientas de GIS, una vez establecidas las direcciones preferenciales de las familias de discontinuidades y cuñas, estas se enfrentan a los valores de orientación de los taludes de la vía, calculándose los factores f_1 , f_2 y f_3 del sistema SMR y el valor de dicha clasificación geomecánica. Los resultados se muestran en términos de SMR mínimo, para condiciones de susceptibilidad a la rotura planar, por cuña y en vuelco, mostrados en las figuras 35, 36 y 37 respectivamente.

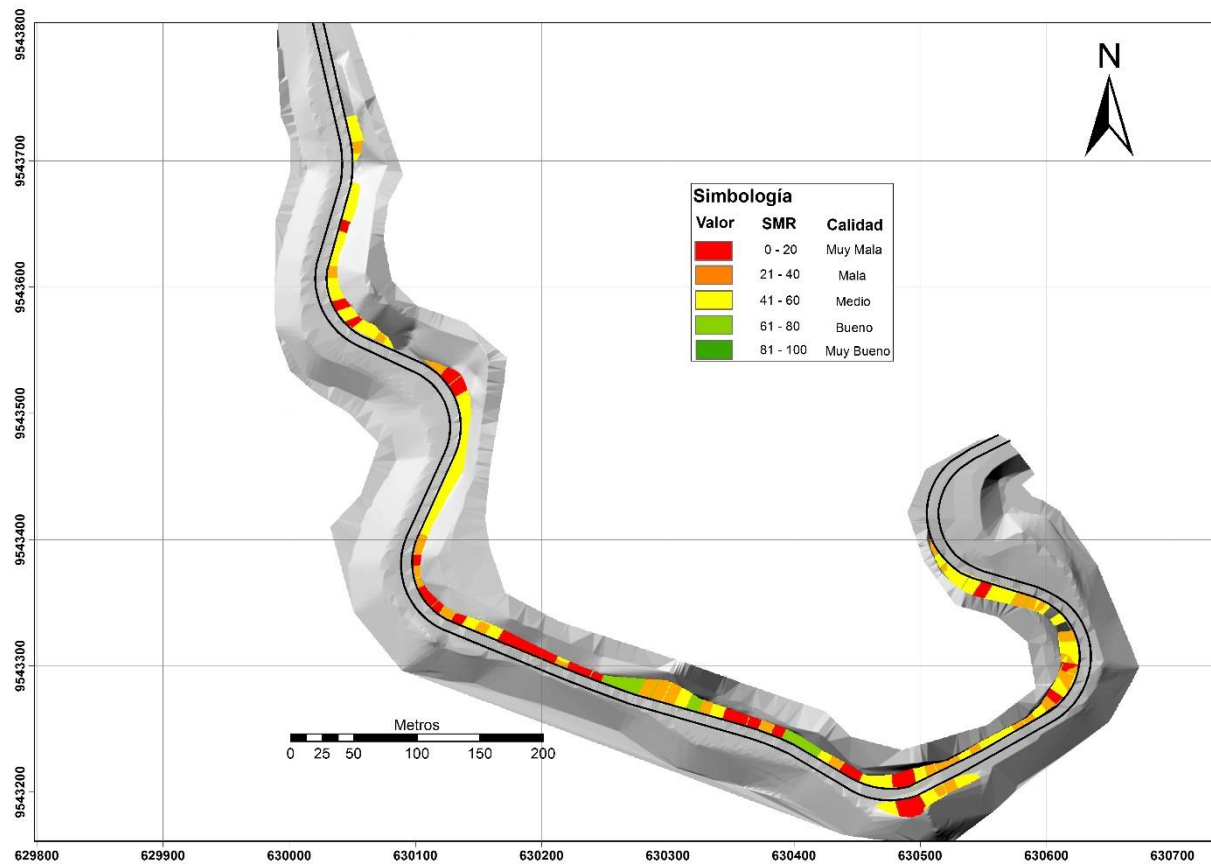


Figura 35. Mapa de susceptibilidad a la rotura planar. Correspondiente a los valores mínimos de SMR

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

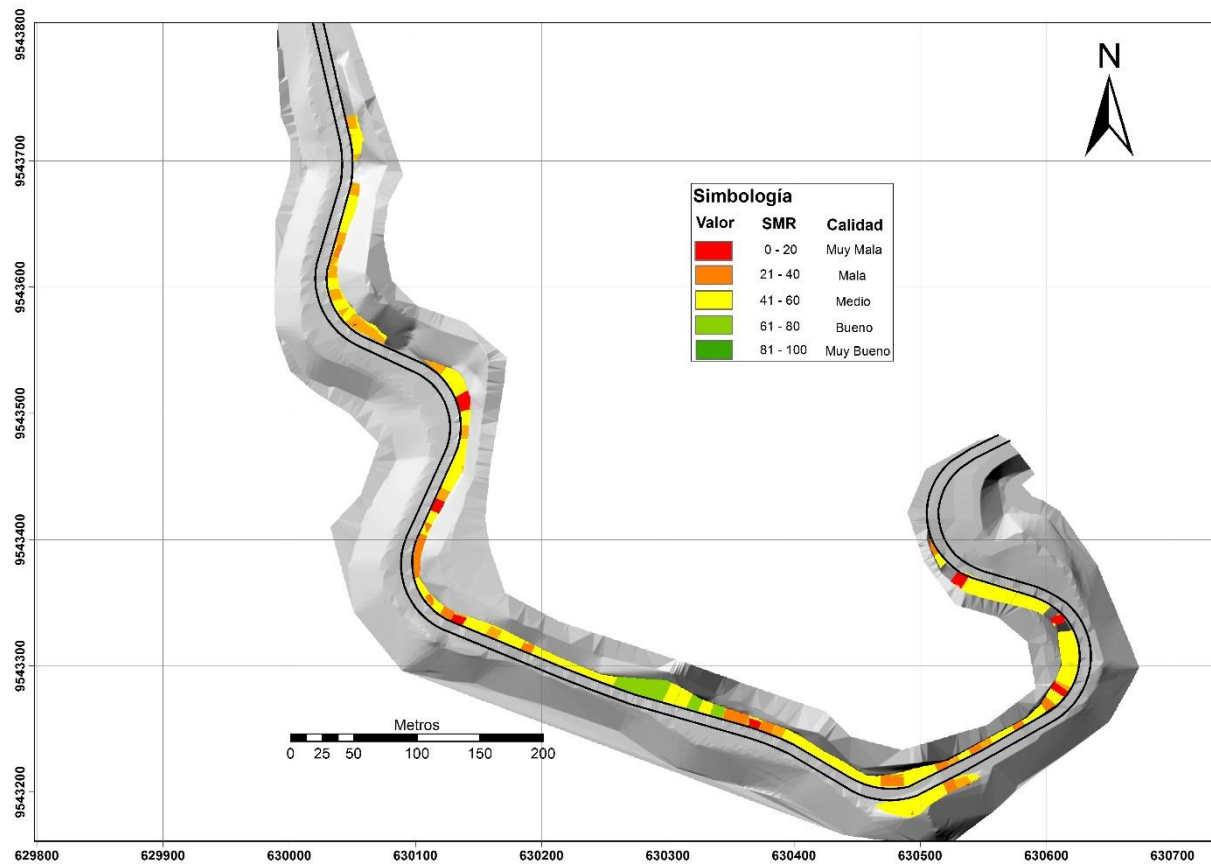


Figura 36. Mapa de susceptibilidad a la rotura por cuña. Correspondiente a los valores mínimos de SMR

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

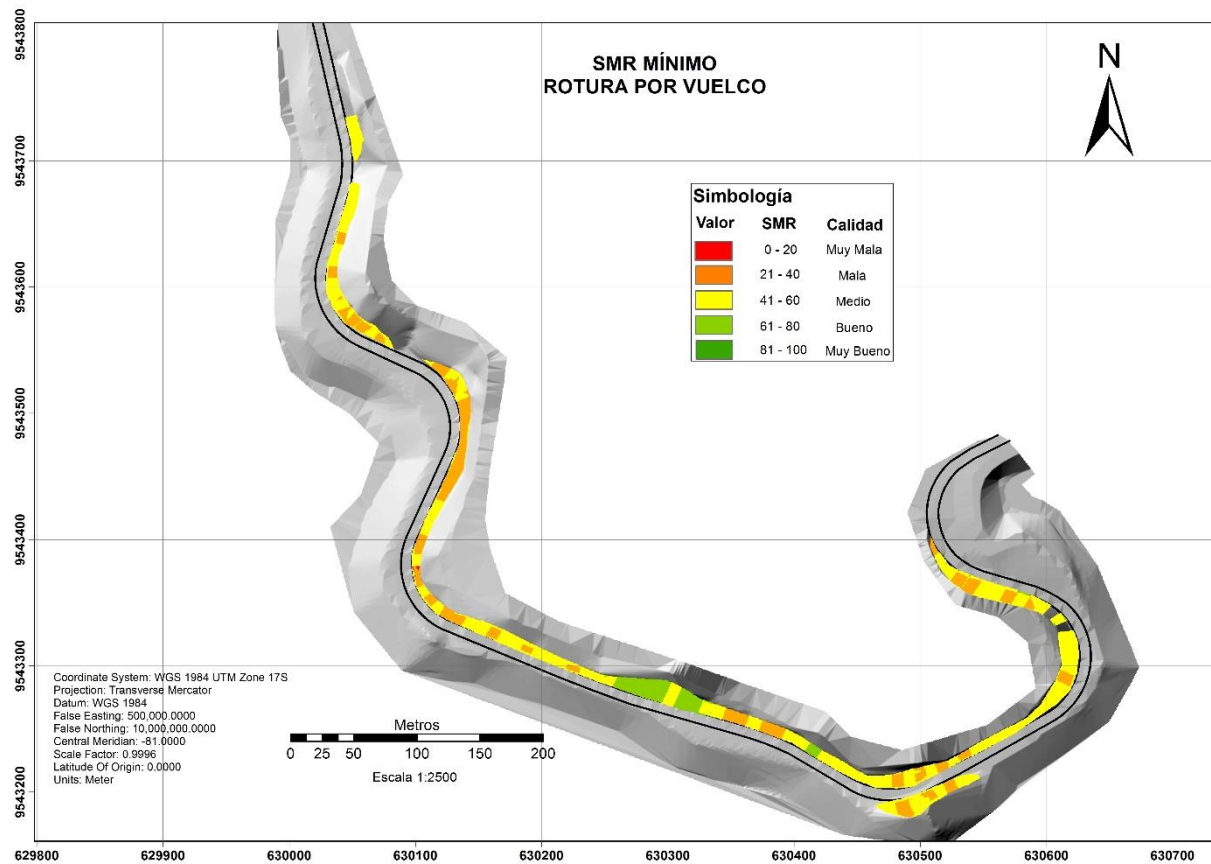


Figura 37. Mapa de susceptibilidad a la rotura por vuelco. Correspondiente a los valores mínimos de SMR

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

4.3. Análisis cinemático

De los mapas de susceptibilidad a rotura planar, en cuña y por vuelco, se han analizado los sectores con SMR de calidad muy mala a mala, los parámetros mecánicos de estas estaciones se han tomado de la caracterización geomecánica y de resistencia, la geometría del talud y orientación se obtuvo del alineamiento del mismo en el centro de la estación de estudio.

4.3.1. Rotura planar.

Se escogieron 8 estaciones con valores de SMR menor a 20, cuyas características estructurales y de resistencia mecánica se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Sectores con valor de SMR menor a 20 en rotura planar y resistencia mecánica

TIPO DE PLANO	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO (°)	BUZAMIENTO (°)	DENSIDAD (KN/m ³)	JCS (Mpa)	JRC	H (m)	ESFUERZO NORMAL (Mpa)	JCS/σ _n	ANGULO RUGOSIDAD (°)	ANGULO RESIDUAL (°)	ANGULO PICO (°)
ZONA 2: 27+590 A 27+600						TALUD: 19/59 (Dir. Buz/Buz)					
F1	341	40	27.5	107.00	9	19	0.4003	267.33	15	22	37
F2	253	86	27.5	149.70	5.5	19	0.0364	4107.24	9	21	30
F3	43	53	27.5	69.04	5.5	19	0.3144	219.56	9	15	25
F4	243	59	27.5	62.76	11	19	0.2691	233.21	19	15	33
F5	224	20	27.5	105.30	11	19	0.491	214.46	19	18	37
ZONA 3: 27+740 A 27+750						TALUD: 136/56 (Dir. Buz/Buz)					
F1	84	21	27	65.74	20	19	0.4789	137.27	34	20	54
F2	194	72	27	65.98	20	19	0.1585	416.18	34	20	54
F3	102	75	27	90.00	20	19	0.1328	677.84	34	26	60
F4	228	28	27	67.43	17	19	0.453	148.87	29	21	49
ZONA 4: 27+890 A 27+900						TALUD: 180/54 (Dir. Buz/Buz)					
F1	173	57	27	45.00	7	13	0.1912	235.39	12	30	42
F2	117	84	27	45.00	8.5	13	0.0367	1226.51	14	26	40
F3	26	6	27	45.00	18	13	0.3491	128.91	31	31	62
F4	48	87	27	45.00	20	13	0.0184	2449.66	34	31	65
ZONA 4: 28+020 A 28+030						TALUD DER.: 203/56 (Dir. Buz/Buz)					
F1	153	66	28.00	103.66	14	11	0.1253	827.48	24	30	54
F2	303	5	28.00	134.69	8.5	11	0.3068	438.97	14	32	46
F3	268	75	28.00	118.70	8.5	11	0.0797	1489.02	14	31	45
ZONA 5: 28+190 A 28+200						TALUD DER.: 201/65 (Dir. Buz/Buz)					
F1	341	40	27.6	98.28	8.8	12	0.2537	387.37	15	34	49
F2	253	86	27.6	45.67	20	12	0.0231	1976.97	34	24	58
F3	43	53	27.6	52.39	20	12	0.1993	262.82	34	25	59
F4	243	59	27.6	98.28	15	12	0.1706	576.15	26	34	60
F5	224	20	27.6	98.28	18	12	0.3112	315.78	30	33	63
ZONA 5: 28+300 A 28+310						TALUD DER.: 236/57 (Dir. Buz/Buz)					
F1	213	85	27.6	81.55	16	9	0.0216	3766.63	27	28	55
F2	87	77	27.6	87.75	7	9	0.0559	1570.46	12	29	41
F3	233	7	27.6	85.69	5.8	9	0.2465	347.57	10	29	38
F4	315	44	27.6	82.41	20	9	0.1787	461.20	34	28	62
F5	169	49	27.6	96.60	12	9	0.163	592.78	20	29	49
ZONA 5: 28+480 A 28+490						TALUD: 240/60 (Dir. Buz/Buz)					
F1	49	73	27.6	98.28	18	20	0.1614	608.96	30	34	64
F2	210	63	27.6	98.28	15	20	0.2506	392.17	26	34	59
F3	308	65	27.6	98.28	12	20	0.2333	421.29	20	32	52
F4	17	18	27.6	98.28	8.5	20	0.525	187.21	14	31	45
ZONA 5: 28+580 A 28+590						TALUD: 201/61 (Dir. Buz/Buz)					
F1	50	80	27.6	98.28	20	16	0.0767	1281.64	34	27	61
F2	185	82	27.6	98.28	8.5	16	0.0615	1599.12	14	34	48
F3	281	21	27.6	98.28	12	16	0.4123	238.39	20	31	51
F4	85	60	27.6	98.28	8.5	16	0.2208	445.11	14	29	43

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

El análisis cinemático muestra los planos de discontinuidades cercanos a rotura planar, de los cuales un 25% de los sectores analizados cumplen las condiciones para que se produzca este tipo de rotura, 37.5% se encuentran en condiciones de borde, es decir que una pequeña variación de la inclinación del talud o del ángulo de fricción de las discontinuidades las pondrían en condiciones de rotura y finalmente, 37.5% de los sectores analizados presentan planos con direcciones de buzamiento similares a las del talud pero dado al ángulo de inclinación del mismo y al ángulo de fricción entre los planos de discontinuidad, no cumplen las condiciones para rotura planar.

De las estaciones analizadas el 33.33% de las discontinuidades de la familias que tiende a rotura planar, rompen efectivamente; es decir que, aproximadamente de la muestra tomada, 8% de las discontinuidades rompe efectivamente en forma planar.

En las figura 38, se muestran los resultados del análisis cinemático de la estación 27+590 a 27+600 como ejemplo.

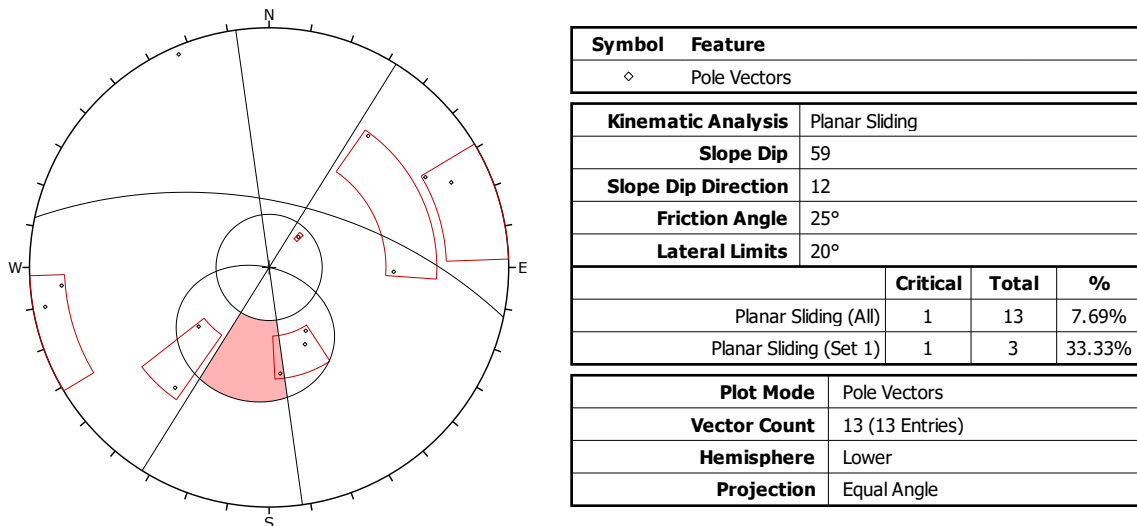


Figura 38. Análisis cinemático a rotura planar abs 27+590 a 27+600 (Dips 6.0)

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

4.3.2. Rotura en cuña.

Se escogieron 7 estaciones con valores de SMR menor a 20, cuyas características estructurales y de resistencia mecánica se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Sectores con valor de SMR menor a 20 en cuña y resistencia mecánica

TIPO DE PLANO	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO (°)		BUZAMIENTO (°)		DENSIDAD (KN/m3)		JCS (Mpa)	JRC	H (m)	ESFUERZO NORMAL (Mpa)		JCS/σ n	ANGULO RUGOSIDAD (°)		ANGULO RESIDUAL (°)		ANGULO PICO (°)		
ZONA 2: 27+570 A 27+580										TALUD: 26/59 (Dir. Buz/Buz)									
F1	215	68	27.5	49.37	9	17	0.1751	281.93	15	13	28								
F2	320	81	27.5	45.43	13	17	0.0731	621.16	22	12	35								
F3	35	35	27.5	30.42	19	17	0.383	79.42	32	10	42								
F4	125	90	27.5	43.32	19	17	3E-17	1.51E+18	32	12	44								
ZONA 2: 27+660 A 27+670										TALUD: 56/60 (Dir. Buz/Buz)									
F1	60	38	27.5	63.80	20	12	0.26	245.34	34	15	49								
F2	333	81	27.5	44.36	20	12	0.0516	859.34	34	12	46								
F3	240	62	27.5	78.87	17	12	0.1549	509.09	29	16	45								
ZONA 3: 27+740 A 27+750										TALUD: 137/55 (Dir. Buz/Buz)									
F1	84	21	27	65.74	20	18	0.4537	144.89	34	20	54								
F2	194	72	27	65.98	20	18	0.1502	439.30	34	20	54								
F3	102	75	27	90.00	20	18	0.1258	715.50	34	26	60								
F4	228	28	27	67.43	17	18	0.4291	157.14	29	21	49								
ZONA 4: 28+020 A 28+030										TALUD DER.: 203/56 (Dir. Buz/Buz)									
F1	153	66	28.00	103.66	14	11	0.1253	827.48	24	30	54								
F2	303	5	28.00	134.69	8.5	11	0.3068	438.97	14	32	46								
F3	268	75	28.00	118.70	8.5	11	0.0797	1489.02	14	31	45								
ZONA 5: 28+270 A 28+280										TALUD DER.: 204/61 (Dir. Buz/Buz)									
F1	181	64	27.6	98.28	18	13	0.1573	624.84	30	34	64								
F2	263	65	27.6	98.28	8.5	13	0.1516	648.13	14	34	48								
F3	344	21	27.6	98.28	5.8	13	0.335	293.40	10	31	41								
F4	64	79	27.6	92.16	18	13	0.0685	1346.18	30	29	59								
ZONA 5: 28+380 A 28+390										TALUD DER.: 299/59 (Dir. Buz/Buz)									
F1	315	84	27.6	96.99	8.5	13	0.0375	2586.14	14	29	44								
F2	236	87	27.6	49.02	8.5	13	0.0188	2610.33	14	25	39								
F3	227	39	27.6	35.62	15	13	0.2788	127.76	26	23	48								
F4	172	51	27.6	34.93	20	13	0.2258	154.72	34	22	56								
F5	305	42	27.6	92.16	15	13	0.2666	345.64	26	29	55								
ZONA 5: 28+470 A 28+480										TALUD: 259/66 (Dir. Buz/Buz)									
F1	89	88	27.6	98.28	8.5	22	0.0212	4637.82	14	34	48								
F2	195	68	27.6	98.28	8.5	22	0.2275	432.07	14	33	47								
F3	299	59	27.6	98.28	12	22	0.3127	314.26	20	30	50								

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

El análisis cinemático muestra los planos de discontinuidades cercanos a rotura, de los cuales un 71.43% de las estaciones analizadas cumplen las condiciones para que se produzca este tipo de rotura y 28.57% se encuentran en condiciones de borde. De las estaciones analizadas el 13.83% de las discontinuidades de la familia de cuñas que tiende a rotura, rompe efectivamente, aproximadamente de la muestra tomada, 10% de las discontinuidades rompe efectivamente en cuña.

En la figura 39, se muestran los resultados del análisis cinemático con redes estereográficas a rotura por cuña de la estación 28+270 a 28+280 como ejemplo.

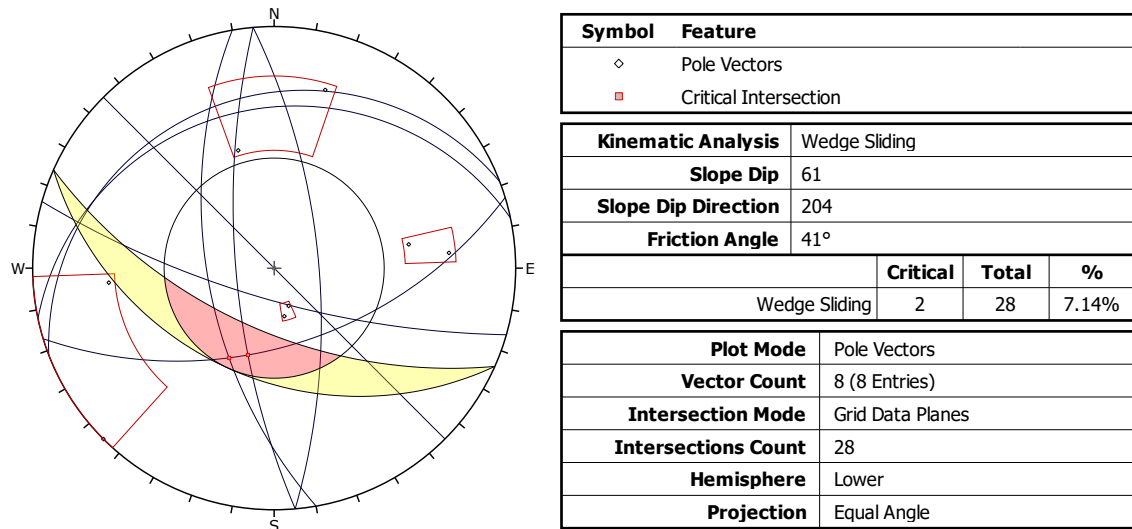


Figura 39. Análisis cinemático a rotura por cuña abs 28+270 a 28+280 (Dips 6.0)

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

4.3.3. Rotura por vuelco.

Se escogieron 7 estaciones con valores de SMR entre 20 a 40 al no presentarse estaciones con valores inferiores a 20, las características estructurales y de resistencia mecánica se muestran en la tabla 23.

El análisis cinemático muestra los planos de discontinuidades cercanos a rotura por vuelco, de los cuales un 42.86% de los sectores analizados cumplen las condiciones para que se produzca este tipo de rotura, 28.57% se encuentran en condiciones de borde y finalmente, 28.57% no cumplen las condiciones para rotura por vuelco.

De las estaciones analizadas 88.89% de las discontinuidades de la familia que tiende a rotura por vuelco, rompe efectivamente; es decir que, aproximadamente de la muestra tomada, 38% de las discontinuidades rompe efectivamente por vuelco.

En las figura 40, se muestran los resultados del análisis cinemático de la estación 28+470 a 28+480 como ejemplo.

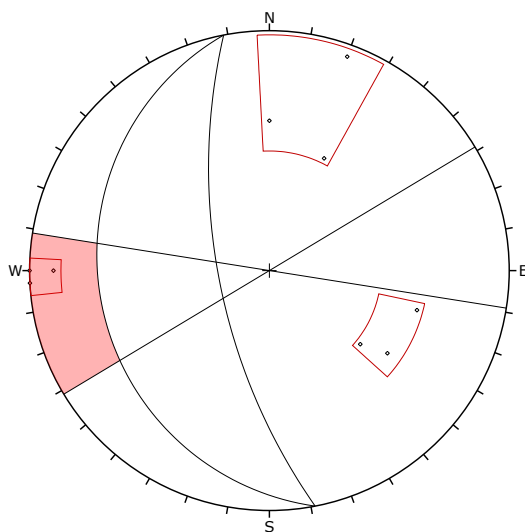
Tabla 23. Sectores con valor de SMR menor a 40 en vuelco y resistencia mecánica

TIPO DE PLANO	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO (°)	BUZAMIENTO (°)	DENSIDAD (KN/m3)	JCS (Mpa)	JRC	H (m)	ESFUERZO NORMAL (Mpa)	JCS/σ _n	ANGULO RUGOSIDAD (°)	ANGULO RESIDUAL (°)	ANGULO PICO (°)
ZONA 2: 27+570 A 27+580						TALUD: 26/59 (Dir. Buz/Buz)					
F1	215	68	27.5	49.37	9	17	0.1751	281.93	15	13	28
F2	320	81	27.5	45.43	13	17	0.0731	621.16	22	12	35
F3	35	35	27.5	30.42	19	17	0.383	79.42	32	10	42
F4	125	90	27.5	43.32	19	17	3E-17	1.51E+18	32	12	44
ZONA 4: 27+890 A 27+900						TALUD: 180/54 (Dir. Buz/Buz)					
F1	173	57	27	45.00	7	13	0.1912	235.39	12	30	42
F2	117	84	27	45.00	8.5	13	0.0367	1226.51	14	26	40
F3	26	6	27	45.00	18	13	0.3491	128.91	31	31	62
F4	48	87	27	45.00	20	13	0.0184	2449.66	34	31	65
ZONA 4: 28+020 A 28+030						TALUD DER.: 203/56 (Dir. Buz/Buz)					
F1	153	66	28.00	103.66	14	11	0.1253	827.48	24	30	54
F2	303	5	28.00	134.69	8.5	11	0.3068	438.97	14	32	46
F3	268	75	28.00	118.70	8.5	11	0.0797	1489.02	14	31	45
ZONA 5: 28+270 A 28+280						TALUD DER.: 204/61 (Dir. Buz/Buz)					
F1	181	64	27.6	98.28	18	13	0.1573	624.84	30	34	64
F2	263	65	27.6	98.28	8.5	13	0.1516	648.13	14	34	48
F3	344	21	27.6	98.28	5.8	13	0.335	293.40	10	31	41
F4	64	79	27.6	92.16	18	13	0.0685	1346.18	30	29	59

TIPO DE PLANO	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO (°)	BUZAMIENTO (°)	DENSIDAD (KN/m3)	JCS (Mpa)	JRC	H (m)	ESFUERZO NORMAL (Mpa)	JCS/σ _n	ANGULO RUGOSIDAD (°)	ANGULO RESIDUAL (°)	ANGULO PICO (°)
ZONA 5: 28+300 A 28+310						TALUD DER.: 236/57 (Dir. Buz/Buz)					
F1	213	85	27.6	81.55	16	9	0.0216	3766.63	27	28	55
F2	87	77	27.6	87.75	7	9	0.0559	1570.46	12	29	41
F3	233	7	27.6	85.69	5.8	9	0.2465	347.57	10	29	38
F4	315	44	27.6	82.41	20	9	0.1787	461.20	34	28	62
F5	169	49	27.6	96.60	12	9	0.163	592.78	20	29	49
ZONA 5: 28+470 A 28+480						TALUD: 259/66 (Dir. Buz/Buz)					
F1	89	88	27.6	98.28	8.5	22	0.0212	4637.82	14	34	48
F2	195	68	27.6	98.28	8.5	22	0.2275	432.07	14	33	47
F3	299	59	27.6	98.28	12	22	0.3127	314.26	20	30	50
ZONA 5: 28+580 A 28+590						TALUD: 201/61 (Dir. Buz/Buz)					
F1	50	80	27.6	98.28	20	16	0.0767	1281.64	34	27	61
F2	185	82	27.6	98.28	8.5	16	0.0615	1599.12	14	34	48
F3	281	21	27.6	98.28	12	16	0.4123	238.39	20	31	51
F4	85	60	27.6	98.28	8.5	16	0.2208	445.11	14	29	43

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

Kinematic Analysis	
Flexural Toppling	
Slope Dip	66
Slope Dip Direction	259
Friction Angle	47°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	3	9	33.33%
Flexural Toppling (Set 1)	3	3	100.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	9 (9 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 40. Análisis cinemático a rotura por vuelco abs 28+470 a 28+480 (Dips 6.0)

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

4.4. Cálculo del factor de seguridad

El análisis cinemático realizado en el literal anterior nos permite determinar los sectores susceptibles a rotura, el factor de seguridad de los mismos se calcula en términos determinísticos cuando hablamos de una discontinuidad específica y en términos probabilísticos para la familia o familias de discontinuidades.

Los parámetros de resistencia del macizo rocoso se obtienen de la caracterización geomecánica y de resistencia realizada, mientras el modelo de talud se obtiene del levantamiento topográfico, en la figura 41, se muestra el modelo de talud abs 27+590 a 27+600 a ser analizado por rotura planar.

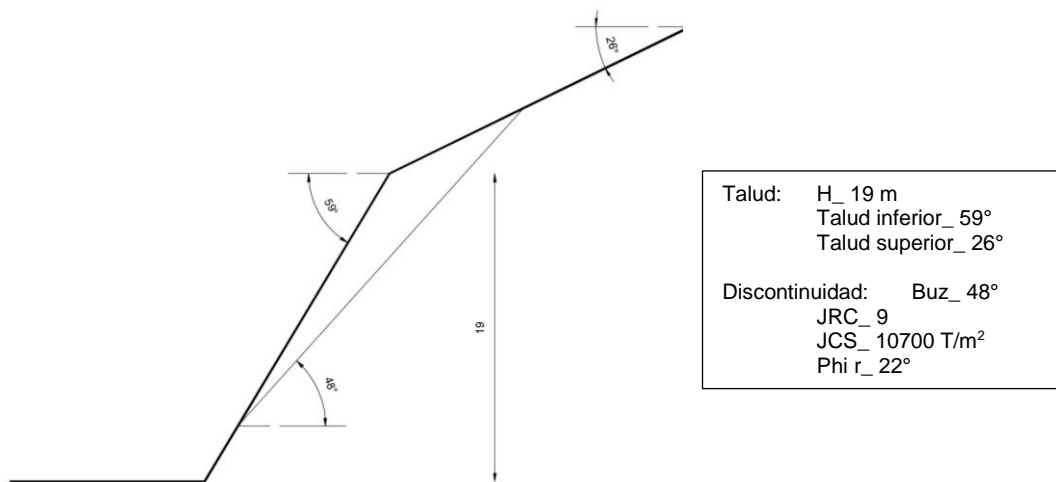


Figura 41. Modelo de talud abs 27+590 a 27+600, a ser analizado a rotura planar

Fuente: El Autor

Elaborado por: El Autor

4.4.1. Factor de seguridad rotura planar.

El cálculo del factor de seguridad se realizó con el software RocPlane (ROCSCIENCE, n.d.) , utilizando los criterios de rotura de Barton (1973). En la figura 42 se muestra el modelo de uno de los planos analizados.

En la tabla 24, se muestran los resultados de cálculo realizados en RocPlane, tanto en términos determinísticos como probabilísticos; se aprecia que el factor de seguridad es superior a uno en todos los puntos de análisis, sin embargo en términos probabilísticos, la posibilidad de rotura aumenta mientras el factor de seguridad se acerca a uno (y en dependencia de la variación de los datos base). De los sectores analizados al azar con SMR

menor a 20 el sector de las abs 27+590 a 27+600 es el que tiene más probabilidades de rotura.

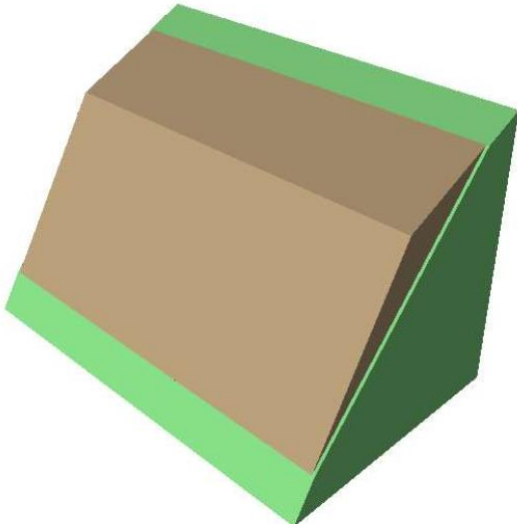


Figura 42. Modelo talud abs 27+590 a 27+600 (RocPlane 2.0)

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

Tabla 24. Resultados de factor de seguridad a rotura planar

FACTOR DE SEGURIDAD ROTURA PLANAR				
KM	PLANO	DETERMINISTA	PROBABILISTA	
		FS	FS promedio	PF
27+590 a 27+600	1	1.19	1.19	71%
27+890 a 27+900	1	2.30	1.24	5%
28+300 a 28+310	1	2.34	3.26	0%

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

4.4.2. Factor de seguridad rotura en cuña.

El cálculo del factor de seguridad se realizó con el software Swedge (ROCSCIENCE, n.d.) , utilizando el criterio general de rotura de Mohr-Coulomb.

En la tabla 25, se muestran los resultados de cálculo realizados en Swedge, tanto en términos determinísticos como probabilísticos; se aprecia que el factor de seguridad es superior a uno en términos determinísticos, pero en el sector de las abscisas 27+570 a 27+580 hay la probabilidad que se presenten valores inferiores a 1, así mismo en términos probabilísticos, la posibilidad de rotura aumenta mientras el factor de seguridad se acerca a uno (y en dependencia de la variación de los datos base). De los sectores analizados al azar con SMR menor a 20 el sector de las abs 27+570 a 27+580 es el que tiene más probabilidades de rotura.

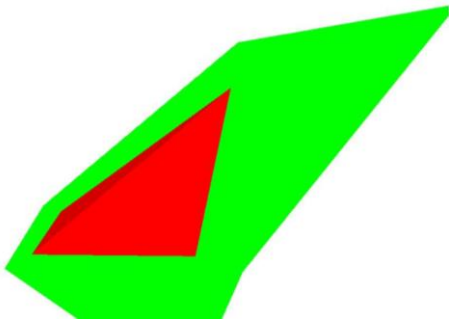


Figura 43. Modelo talud abs 28+380 a 28+390 (Swedge 4.0)

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

Tabla 25. Resultados de factor de seguridad a rotura planar

FACTOR DE SEGURIDAD ROTURA POR CUÑA				
KM	CUÑA	DETERMINISTA	PROBABILISTA	
		FS	FS promedio	PF
27+570 a 27+580	1	1.28	0.98	25%
	2	3.31		
	3	1.28		
27+740 a 27+750	1	2.01	2.01	0%
28+270 a 28+280	1	2.02	1.98	0%
	2	2.09		
28+380 a 28+390	1	2.27	1.68	0%
	2	1.58		
28+470 a 28+480	1	1.26	1.31	6.8%
	2	2.04		
	3	2.60		

Fuente: El Autor
Elaborado por: El Autor

4.5. Susceptibilidad a la generación de procesos de inestabilidad

Los procesos de inestabilidad en taludes rocosos, como han sido analizados en el presente trabajo, tienen tres factores desencadenantes principales:

Valor de RMR.- En independencia de la orientación de las discontinuidades, la disminución de este índice de calidad del macizo rocoso, predice caída de rocas menores, roturas planares o en cuña, hasta la posibilidad de roturas en masa.

Orientación de las discontinuidades.- La coincidencia de la orientación de las discontinuidades con la orientación del talud, aumenta drásticamente la posibilidad a rotura de los taludes rocosos. El SMR recoge la susceptibilidad total, tanto por mala calidad del macizo rocoso, como por orientación de sus discontinuidades.

Variación del ángulo de fricción pico del plano de la discontinuidad.- De acuerdo a la teoría de rotura de Barton (1973), pese a lo desfavorable al deslizamiento del plano de las discontinuidades con respecto al talud, el ángulo de rozamiento de dichas discontinuidades definen finalmente si la rotura se produce o no. A la vez, el ángulo de fricción pico está en dependencia de otros factores desencadenantes externos que son:

- Altura del talud (esfuerzo normal)
- Rugosidad del plano de discontinuidad (JRC)
- Resistencia mecánica del plano de discontinuidad (JSC)
- Ángulo de fricción de básico de la roca (o residual cuando el plano de la discontinuidad se encuentra alterado); que a la vez depende de condiciones de humedad del talud.

De esta manera la generación de un proceso de inestabilidad puede analizado cualitativamente por medio del SMR y cuantitativamente por medio un criterio de rotura.

CONCLUSIONES

Del análisis de estabilidad de macizos rocosos mediante uso de SIG y su aplicación al sector Lucarqui, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Geológicamente el área de estudio se encuentra emplazada en la Unidad Celica de Piedra, especialmente sobre tobas y lavas de composición andesítica a andesito-basáltica.
- La aplicación de la instrumentación adecuada para la recolección de datos, muestreo, ensayos y análisis de estabilidad en macizos rocosos utilizada en esta investigación permiten obtener resultados confiables y establecer parámetros reales del sector estudiado. En relación a análisis de datos tomados en función de observaciones visuales (ojo entrenado) como generalmente se lo ha realizado en la región.
- El uso del martillo de Schmidt es ideal para la caracterización de la resistencia de la discontinuidad. Sin embargo este instrumento no es adecuado para utilizar en la obtención de la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa, dado a que producto de la microfisuración del macizo rocoso el ensayo de compresión simple arrojará resultados menores que el martillo de Schmidt.
- El levantamiento topográfico a detalle, la caracterización geomecánica sistemática y el uso de funciones continuas de RMR y SMR, facilitan el cálculo y representación mediante herramientas de SIG,
- Los mapas de susceptibilidad a la rotura encontrados mediante la caracterización SMR y herramientas de SIG, facilitan el análisis cinemático, diferenciando entre susceptibilidad a rotura planar, en cuña y por vuelco, el detalle de esta caracterización geomecánica depende de la definición de las zonas litoestructurales, subzonas y estaciones.
- Dado a la variabilidad de resultados de los valores de RMR o SMR, entre las diferentes familias de discontinuidades que se pueden encontrar en una zona; para la elaboración de un mapa de susceptibilidad es recomendable utilizar los valores mínimos, es decir los valores críticos (o más susceptibles).
- El área de estudio no posee direcciones preferenciales de sus familias de discontinuidades que gobiernen a toda el área de estudio o zonas, por lo tanto se debe discretizar a valores promedio por estaciones.

- El uso de SIG ayuda a visualizar el panorama de variación de los valores de SMR a lo largo de la vía, datos que manejados a manera de tablas necesitan un análisis minucioso para su interpretación.
- El uso de SIG, facilita el cálculo del SMR, con manejo de miles de datos de manera automática.
- El valor predominante mínimo de RMR, corresponde a calidad media, tiempo de mantenimiento semanal en vanos de 5m; además cohesión entre 2-3 Kp/cm² y ángulo de rozamiento entre 25°-35°, según Bieniawski (1989).
- El 20% de los valores SMR a rotura planar corresponden a calidad mala, lo cual significa taludes inestables, con rotura planar o grandes cuñas; y, una probabilidad de rotura del 60%; y el 20% de los valores de SMR corresponden a calidad muy mala lo cual significa taludes completamente inestables, con grandes roturas por planos continuos o por masas; y, una probabilidad de rotura del 90% según Romana (1985).
- El 25% de los valores SMR a rotura en cuña corresponden a calidad mala, lo cual significa taludes inestables, con rotura planar o grandes cuñas; y, una probabilidad de rotura del 60%; y el 5% de los valores de SMR corresponden a calidad muy mala lo cual significa taludes completamente inestables, con grandes roturas por planos continuos o por masas; y, una probabilidad de rotura del 90% según Romana (1985).
- El 25% de los valores SMR a rotura por vuelco corresponden a calidad mala, lo cual significa taludes inestables; y, una probabilidad de rotura del 60% según Romana (1985).
- Los valores de RMR y SMR, deben analizarse por separado, dado a no son ni directa ni inversamente proporcionales.
- En un caso ideal de un RMR uniforme, entre las familias de discontinuidades y gobernado por orientaciones preferenciales de sus discontinuidades bien definidas, el SMR será el reflejo ideal de susceptibilidad a la rotura.
- Las características mecánicas de las discontinuidades y la geometría del talud, definen finalmente el factor de seguridad del mismo y su probabilidad de rotura; siendo los valores recomendados por Romana (1985) conservadores.
- Los resultados obtenidos en el presente trabajo están analizados en condiciones secas, siendo la etapa invernal el evento desencadenante crítico desencadenante de la inestabilidad y por el cual la probabilidad de rotura aumente drásticamente.

RECOMENDACIONES

De los resultados del análisis de estabilidad realizado se pueden realizar las siguientes recomendaciones:

- Aunque no fue objeto de este trabajo, se recomienda que en una caracterización geomecánica RMR de calidad muy mala, sin necesidad de calcular su SMR (el cual podría llegar a tener valores inferiores a cero para discontinuidades desfavorables), se realice un análisis cinemático y de estabilidad en masa utilizando criterios de rotura a través de la matriz.
- En el caso específico de nuestro tramo de vía, de acuerdo a lo sugerido por Romana (1985), tenemos las siguientes medidas de mitigación: re-excavación, drenaje superficial, concreto lanzado y concreto de relleno.
- Para nuestro tramo de estudio se recomienda en base a lo estipulado por Romana, retaluzado a talud 1H:1.2V, a los sectores con SMR muy malo y comprobados planos desfavorables al deslizamiento.
- Colocación de cunetas de coronación a una distancia de 5m de la corona para evitar flujo de agua sobre el talud en etapa invernal.
- Reemplazando el concreto lanzado se recomienda uso de mallas de contención de los bloques caídos; y, construcción de trincheras de contención y depósito.
- Finalmente se recomienda el mantenimiento rutinario semanal del sistema.

Para futuras investigaciones se recomienda lo siguiente:

- Análisis estadístico de las características geomecánicas de los taludes.
- Uso de la metodología en taludes mineros de labores mineras.
- Investigación en metodologías de recolección de datos semiautomáticos, como fotografías, laser escáner, etc.
- En base a los datos estructurales recolectados, investigación en la rama de la geología estructural.

BIBLIOGRAFÍA

- Adler, R. E. (1982). *Statistische Methoden in der Tektonik II-Das Schmidtsche Netz und seine Anwendung im Bereich des makroskopischen Gefüges*. (E. Pilger, Ed.).
- Andes. (2016). Presidente de Ecuador destaca histórica inversión de 9.000 kilómetros en vialidad durante los últimos 9 años. Retrieved from <http://www.andes.info.ec/es/noticias/presidente?ecuador?destaca?historica?inversion?9000?kilometros?vialidad?durante?ultimos?9>
- Barton, N. (1973). Barton-A new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*.
- Barton, N., & Bandis, S. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice.pdf. *Rock Joints*, 603–610.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 54.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6, 48.
- Bieniawski. (2011, June 29). Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección. *Geocontrol*, 35. Retrieved from http://www.geocontrol.es/publicaciones/EB-189_adif_errores_en_la_aplicacion_bieniawski.pdf
- Bieniawski, R. (2011). *Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección*. *Geocontrol*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *ENGINEERING ROCK MASS CLASSIFICATIONS*. (WILEY-INTERSCIENCE, Ed.). Pennsylvania.
- Deere, D. (1989). ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD). *U.S. Army Corps Engrs, Contract R*.
- Deere, D. U., & Miller, R. . (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. *Technical Report, Air Force Weapons Laboratory*, 1, 65–116.
- EcuRed. (2016). Infraestructura vial. Retrieved from www.ecured.cu/Infraestructura_vial
- Eguez, A., & Poma, O. (2001). La Cuenca Alamor - Lancones en el Contexto Geodinámico

de los Andes de Huancabamba. *Cuartas Jornadas En Ciencias de La Tierra*, 19–21.

Francisco, M. (2015). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL*. Guachanama. Retrieved from http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1160027280001_PDO T GUACHANAMA 15-10-2015-1_15-10-2015_10-21-32.pdf

Gonzalez De Vallejo, L; Ferrer, M; Ortuño, L; Oteo, C. (2002). *Ingenieria Geologica*. (P. EDUCATION, Ed.). Madrid.

IGEMMET, & DINAGE. (2005). MEMORIAS MAPA GEOLOGICO BINACIONAL ECUADOR PERU.

INIGEMM. (2012). Hoja Geológica Cariamanga. Retrieved from http://www.geoinvestigacion.gob.ec/mapas/100K_r/HOJAS_GEOLOGICAS_100k/CARIAMANGA_PSAD56_Z17S.compressed.pdf

Irigaray, C., & Chacon, J. (2001). Evaluación de la estabilidad en taludes rocosos. Aplicación del SMR mediante un SIG, (October 2016).

Irigaray, C., El Hamdouni, R., Jiménez-Perálvarez, J. D., Fernández, P., & Chacón, J. (2012). Spatial stability of slope cuts in rock massifs using GIS technology and probabilistic analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(3), 569–578. <http://doi.org/10.1007/s10064-011-0414-3>

Irigaray, C., Fernández, T., & Cahacón, J. (2003). Preliminary Rock-Slope-Susceptibility Assessment Using GIS and the SMR Classification. *Natural Hazards*, 30, 309–324.

LaHora. (2011). Abundan derrumbes en la Loja-Zamora. *Nacional*, pp. 1–2. Retrieved from http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101172417/?1/Abundan_derrumbes_en_la_Loja?Zamora_.html#.WA18rvnhDIV

LaHora. (2013, January 26). Vía a Loja habilitada en sus dos carriles. *NOTICIAS ZAMORA*. Zamora. Retrieved from http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101456782/-1/Vía_a_Loja_habilitada_en_sus_dos_carriles_.html#.WAtzT-B96hc

Lisle, R., & Lesion, P. (2004). Técnicas de proyección estereográfica para geólogos e ingenieros civiles. *Nature*, (2), 112.

Melentijevic, S. (2005). *ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS CON*

CRITERIOS DE ROTURA NO LINEALES Y LEYES DE FLUENCIA NO ASOCIADA.

Universidad Politécnica de Madrid.

- MTOP. (2016). Subsecretaría de infraestructura del transporte dirección de conservación del transporte.
- Palmstrom, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*, 20, 362–377.
- Rivera, J. (2015). “ La red vial es imprescindible para el desarrollo y crecimiento de un país .” *Analucia Guzmán Boza, Udep*, pp. 1–8. Retrieved from <http://udep.edu.pe/hoy/2015/la-red-vial-es-imprescindible-para-el-desarrollo-y-crecimiento-de-un-pais/>
- ROCSCIENCE. (n.d.). *Slope Stability with Rocscience software*.
- ROCSCIENCE. (2013). *Dips 6.0*.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *ISRM*, 49–53.
- Romana, M., Tomas, R., & Seron, J. . (2015). Slope Mass Rating (Smr) Geomechanics Classification: Thirty Years Review. *ISRM Congress 2015 Proceedings - International Symposium on Rock Mechanics*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Stimpson, B. (1981). A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 18(1), 63–65. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90266-7](http://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90266-7)
- Tomas, R., Delgado, J., Cano, M., & Cuenca, A. (2009). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA APLICACIÓN DEL SLOPE MASS RATING CONTINUO (SMR-C) MEDIANTE UN, 27–30.
- Tomás, R., Delgado, J., & Serón, J. . (2007). MODIFICATION OF SLOPE MASS RATING (SMR) BY CONTINUOUS FUNCTIONS. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 1062–1069.
- Turner, A. K., & Schuster, R. L. (eds). (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247, Transportation Research Board and National Research*



Council. 1996. 0-309-06151-2. Retrieved from
<http://www.trb.org/Publications/Blurbs/153305.aspx>

VALLEJO, L. I. G.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. (P. Hall, Ed.) (202nd ed.). España.

Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2007). Rock Slope Engineering civil and mining. *Environmental and Engineering Geoscience*, 13(4), 369–370.

ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS GEOLÓGICO

PROYECTO:	Análisis de la Estabilidad de Macizos Rocosos Mediante el uso de SIG y su Aplicación al Sector Lucarqui (Loja, Ecuador)	ZONA:	1	HOJA/PLANO:	1 / 1		
REALIZADO POR:	DIEGO I. CASTILLO J. & GABRIELA GONZALES	LOCALIZACIÓN:	27+530 A 27+550	FOTO:	1-2		
FECHA:	FEBRERO DE 2017						
LITOLOGÍA	NATURALEZA: VOLCANO SEDIMENTARIA		POTENCIA: 9 M	FORMACIÓN Y EDAD: FORMACIÓN PUNTA DE PIEDRA (CRETÁCICO)			
FORMACIONES SUPERFICIALES	NATURALEZA Y TEXTURA: REGOLITO DE TOBA, DE TEXTURA BRECHOSA ARCHILLOSA CON COBERTURA VEGETAL FORMADA POR ARBUSTOS Y CEIBOS		MORFOLOGÍA: AFLORAMIENTO VERTICAL ARTIFICIAL, EROSIONADO	ESPESOR: 2-10 m			
ESTRUCTURA	PLIEGUES	FALLAS	OTROS: FAMILIAS DE JUNTAS				
FRAGMENTACIÓN	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 alterada (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							
FOTO N° 1				FOTO N° 2			
							

RESUMEN DE VALORES DE CLASIFICACION RMR

ZONA	ABSCISA	FAMILIA	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO O (°)	UZAMIENTO (°)	RMR	CLASE	CALIDAD	ZONA	ABSCISA	FAMILIA	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO O (°)	UZAMIENTO (°)	RMR	CLASE	CALIDAD
1	7+530 A 27+55	J1	61	59	41.20	III	Media	4	7+820 A 27+83	J4	215	33	45.19	III	Media
1	7+530 A 27+55	J2	143	89	39.79	IV	Mala	4	7+820 A 27+83	J5	170	38	45.19	III	Media
1	7+530 A 27+55	J3	11	50	36.40	IV	Mala	4	7+830 A 27+84	J1	81	16	49.54	III	Media
1	7+530 A 27+55	J4	197	45	36.62	IV	Mala	4	7+830 A 27+84	J2	184	63	47.88	III	Media
2	7+550 A 27+56	J1	266	86	65.31	II	Buena	4	7+830 A 27+84	J3	112	76	47.37	III	Media
2	7+550 A 27+56	J2	186	73	60.05	II	Buena	4	7+830 A 27+84	J4	314	64	49.63	III	Media
2	7+550 A 27+56	J3	59	39	63.27	II	Buena	4	7+840 A 27+85	J1	128	14	49.03	III	Media
2	7+550 A 27+56	J4	131	85	61.18	II	Buena	4	7+840 A 27+85	J2	173	48	48.98	III	Media
2	7+550 A 27+56	J5	360	36	56.78	III	Media	4	7+840 A 27+85	J3	110	68	45.18	III	Media
2	7+560 A 27+57	S0	59	37	48.81	III	Media	4	7+840 A 27+85	J4	224	49	49.19	III	Media
2	7+570 A 27+58	J1	215	68	46.84	III	Media	4	7+850 A 27+86	J1	92	26	42.24	III	Media
2	7+570 A 27+58	J2	320	81	60.34	II	Buena	4	7+850 A 27+86	J2	225	70	36.68	IV	Mala
2	7+570 A 27+58	J3	35	35	65.54	II	Buena	4	7+850 A 27+86	J3	289	84	41.73	III	Media
2	7+570 A 27+58	J4	125	90	64.84	II	Buena	4	7+850 A 27+86	J4	175	50	35.30	IV	Mala
2	7+580 A 27+59	J1	34	44	62.60	II	Buena	4	7+860 A 27+87	J1	240	16	55.28	III	Media
2	7+580 A 27+59	J2	286	83	57.61	III	Media	4	7+860 A 27+87	J2	69	35	50.16	III	Media
2	7+580 A 27+59	J3	209	76	59.51	III	Media	4	7+860 A 27+87	J3	285	86	54.63	III	Media
2	7+580 A 27+59	J4	343	57	57.44	III	Media	4	7+860 A 27+87	J4	243	57	56.93	III	Media
2	7+590 A 27+60	J1	341	40	50.72	III	Media	4	7+860 A 27+87	J5	346	41	58.66	III	Media
2	7+590 A 27+60	J2	253	86	48.61	III	Media	4	7+870 A 27+88	J1	161	86	63.72	II	Buena
2	7+590 A 27+60	J3	43	53	49.50	III	Media	4	7+870 A 27+88	J2	87	76	57.92	III	Media
2	7+590 A 27+60	J4	243	59	53.10	III	Media	4	7+870 A 27+88	J3	352	69	56.58	III	Media
2	7+590 A 27+60	J5	224	20	50.36	III	Media	4	7+870 A 27+88	J4	196	66	57.83	III	Media
2	7+600 A 27+61	J1	333	37	57.54	III	Media	4	7+880 A 27+89	J1	173	84	60.30	II	Buena
2	7+600 A 27+61	J2	227	82	54.98	III	Media	4	7+880 A 27+89	J2	100	73	55.89	III	Media
2	7+600 A 27+61	J3	340	87	57.01	III	Media	4	7+880 A 27+89	J3	35	23	52.25	III	Media
2	7+600 A 27+61	J4	90	42	63.32	II	Buena	4	7+880 A 27+89	J4	230	82	55.55	III	Media
2	7+610 A 27+62	J1	349	36	62.61	II	Buena	4	7+880 A 27+89	J5	254	15	56.07	III	Media
2	7+610 A 27+62	J2	98	84	57.33	III	Media	4	7+890 A 27+90	J1	173	57	47.11	III	Media
2	7+610 A 27+62	J3	193	67	55.63	III	Media	4	7+890 A 27+90	J2	117	84	45.73	III	Media
2	7+610 A 27+62	J4	335	81	55.19	III	Media	4	7+890 A 27+90	J3	26	6	52.60	III	Media
2	7+620 A 27+63	J1	358	34	62.42	II	Buena	4	7+890 A 27+90	J4	48	87	48.39	III	Media
2	7+620 A 27+63	J2	270	83	62.53	II	Buena	4	7+900 A 27+91	J1	170	62	45.51	III	Media
2	7+620 A 27+63	J3	184	73	61.70	II	Buena	4	7+900 A 27+91	J2	227	68	49.15	III	Media
2	7+620 A 27+63	J4	78	29	61.49	II	Buena	4	7+900 A 27+91	J3	91	49	43.49	III	Media
2	7+630 A 27+64	J1	7	41	52.10	III	Media	4	7+900 A 27+91	J4	355	44	46.90	III	Media
2	7+630 A 27+64	J2	274	71	53.71	III	Media	4	7+910 A 27+92	J1	180	73	64.53	III	Media
2	7+630 A 27+64	J3	180	80	52.16	III	Media	4	7+910 A 27+92	J2	240	60	50.50	II	Buena
2	7+640 A 27+65	J1	19	31	59.66	III	Media	4	7+910 A 27+92	J3	178	38	73.36	II	Buena
2	7+640 A 27+65	J2	161	89	61.65	II	Buena	4	7+910 A 27+92	J4	333	45	56.29	III	Media
2	7+640 A 27+65	J3	248	71	58.56	III	Media	4	7+910 A 27+92	J5	110	80	62.26	II	Buena
2	7+640 A 27+65	J4	103	45	59.62	III	Media	4	7+920 A 27+93	J1	144	61	65.65	II	Buena
2	7+660 A 27+66	J1	60	38	63.72	II	Buena	4	7+920 A 27+93	J2	44	32	60.17	II	Buena
2	7+660 A 27+66	J2	333	81	61.61	II	Buena	4	7+920 A 27+93	J3	237	65	56.41	III	Media
2	7+660 A 27+66	J3	240	62	64.13	II	Buena	4	7+920 A 27+93	J4	233	66	52.51	III	Media
2	7+680 A 27+68	J1	68	37	48.63	III	Media	4	7+930 A 27+94	J1	232	76	56.91	III	Media
2	7+680 A 27+68	J2	134	77	46.98	III	Media	4	7+930 A 27+94	J2	167	65	56.54	III	Media
2	7+680 A 27+68	J3	77	86	46.76	III	Media	4	7+930 A 27+94	J3	334	18	59.39	III	Media
2	7+680 A 27+68	J4	178	61	47.13	III	Media	4	7+930 A 27+94	J4	344	75	60.79	II	Buena
2	7+690 A 27+69	J1	38	36	58.80	III	Media	4	7+940 A 27+95	J1	231	69	53.27	III	Media
2	7+690 A 27+69	J2	180	75	55.99	III	Media	4	7+940 A 27+95	J2	160	72	54.51	III	Media
2	7+690 A 27+69	J3	89	89	59.68	III	Media	4	7+940 A 27+95	J3	339	20	59.39	III	Media
2	7+690 A 27+69	J4	211	40	54.06	III	Media	4	7+940 A 27+95	J4	11	70	59.67	III	Media
2	7+700 A 27+71	J1	53	22	55.58	III	Media	4	7+950 A 27+96	J1	126	77	55.12	III	Media
2	7+700 A 27+71	J2	154	71	52.93	III	Media	4	7+950 A 27+96	J2	175	67	57.85	III	Media
2	7+700 A 27+71	J3	98	75	58.40	III	Media	4	7+950 A 27+96	J3	295	30	55.15	III	Media
2	7+700 A 27+71	J4	206	54	58.25	III	Media	4	7+960 A 27+97	J1	290	32	58.03	III	Media
2	7+710 A 27+72	J1	85	21	55.05	III	Media	4	7+960 A 27+97	J2	160	72	61.05	II	Buena
2	7+710 A 27+72	J2	154	67	52.58	III	Media	4	7+960 A 27+97	J3	104	85	65.88	II	Buena
2	7+710 A 27+72	J3	95	83	57.67	III	Media	4	7+960 A 27+97	J4	216	83	62.16	II	Buena
2	7+710 A 27+72	J4	266	40	58.54	III	Media	4	7+970 A 27+98	J1	225	85	64.16	II	Buena
2	7+720 A 27+73	J1	80	34	49.37	III	Media	4	7+970 A 27+98	J2	85	87	73.61	II	Buena
2	7+720 A 27+73	J2	161	77	51.20	III	Media	4	7+970 A 27+98	J3	310	44	70.09	II	Buena
2	7+720 A 27+73	J3	274	69	48.73	III	Media	4	7+980 A 27+99	J1	190	73	61.67	II	Buena
2	7+730 A 27+74	J4	219	46	51.53	III	Media	4	7+980 A 27+99	J2	95	50	63.95	III	Buena
2	7+730 A 27+74	J1	91	32	54.23	III	Media	4	7+980 A 27+99	J3	224	89	61.77	III	Media
2	7+730 A 27+74	J2	167	72	55.34	III	Media	4	7+990 A 28+00	J1	190	73	62.72	II	Buena
2	7+730 A 27+74	J3	114	82	56.81	III	Media	4	7+990 A 28+00	J2	95	50	68.85	II	Buena
2	7+730 A 27+74	J4	222	64	57.36	III	Media	4	7+990 A 28+00	J3	44	82	68.74	II	Buena
3	7+740 A 27+75	J1	84	21	51.00	III	Media	4	8+000 A 28+01	J1	189	85	33.51	IV	Mala
3	7+740 A 27+75	J2	194	72	49.70	III	Media	4	8+000 A 28+01	J2	85	84	36.88	IV	Mala
3	7+740 A 27+75	J3	102	75	49.35	III	Media	4	8+000 A 28+01	J3	275	34	38.04	IV	Mala
3	7+740 A 27+75	J4	228	28	51.68	III	Media	4	8+010 A 28+02	J1	217	69	47.55	III	Media
3	7+750 A 27+76	J1	82	20	46.64	III	Media	4	8+010 A 28+02	J2	139	63	40.49	III	Media
3	7+750 A 27+76	J2	157	81	45.60	III	Media	4	8+010 A 28+02	J3	66	56	48.70	III	Media
3	7+750 A 27+76	J3	109	81	44.30	III	Media	4	8+010 A 28+02	J4	306	70	38.35	IV	Mala
3	7+750 A 27+76	J4	210	33	44.37	III	Media	4	8+020 A 28+03	J1	153	66	54.50	III	Media
3	7+760 A 27+77	J1	8	21	50.48	III	Media	4	8+020 A 28+03	J2	303	5	51.72	III	Media
3	7+760 A 27+77	J2	160	72	45.76	III	Media	4	8+020 A 28+03	J3	268	75	52.19	III	Media
3	7+760 A 27+77	J3	270	69	47.04	III	Media	4	8+030 A 28+03	J1	201	82	41.42	III	Media
3	7+760 A 27+77	J4	300	46	49.66	III	Media	4	8+030 A 28+03	J2	126	63	39.45	IV	Mala
3	7+770 A 27+78	J1	82	26	49.86	III	Media	4	8+030 A 28+03	J3	279	5	42.03	III	Media
3	7+770 A 27+78	J2	187	78	53.11	III	Media	4	8+030 A 28+03	J4	326	51	38.49	IV	Mala
3	7+770 A 27+78	J3	267	86	51.33	III	Media	5	8+050 A 28+04	J1	36	87	64.82	II	Buena
3	7+770 A 27+78	J4	319	33	53.53	III	Media	5	8+050 A 28+04	J2	114	68	62.24	II	Buena
3	7+780 A 27+79	J1	79	19	45.52	III	Media	5	8+050 A 28+04	J3	347	32	67.41	II	Buena
3	7+780 A 27+79	J2	164	75	48.18	III	Media	5	8+050 A 28+04	J4	160	64	66.53	II	Buena
3	7+780 A 27+79	J3	117	47	46.90	III	Media	5	8+050 A 28+04	J5	233	29	82.86	I	Muy Buena
3	7+780 A 27+79	J4	219	46	51.48	III	Media	5	8+						

ZONA	ABSCISA	FAMILIA	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO O (°)	UZAMIENTO (°)	RMR	CLASE	CALIDAD	ZONA	ABSCISA	FAMILIA	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO O (°)	UZAMIENTO (°)	RMR	CLASE	CALIDAD
5	B+090 A 28+10	J2	200	82	59.40	III	Media	5	B+320 A 28+33	J1	238	84	46.64	III	Media
5	B+090 A 28+10	J3	245	82	61.12	II	Buena	5	B+320 A 28+33	J2	96	86	47.21	III	Media
5	B+090 A 28+10	J4	341	26	69.31	II	Buena	5	B+320 A 28+33	J4	313	33	47.05	III	Media
5	B+090 A 28+10	J5	155	72	63.12	II	Buena	5	B+320 A 28+33	J5	130	46	45.97	III	Media
5	B+100 A 28+11	J1	330	75	69.53	II	Buena	5	B+320 A 28+33	J6	185	71	48.75	III	Media
5	B+100 A 28+11	J2	224	79	67.72	II	Buena	5	B+330 A 28+34	J1	55	79	42.02	III	Media
5	B+100 A 28+11	J3	114	69	78.38	II	Buena	5	B+330 A 28+34	J2	93	86	41.84	III	Media
5	B+100 A 28+11	J4	330	22	78.38	II	Buena	5	B+330 A 28+34	J3	268	36	41.72	III	Media
5	B+110 A 28+12	J1	233	84	64.72	II	Buena	5	B+330 A 28+34	J4	318	40	42.47	III	Media
5	B+110 A 28+12	J2	153	65	66.99	II	Buena	5	B+330 A 28+34	J5	120	39	41.24	III	Media
5	B+110 A 28+12	J3	322	26	74.55	II	Buena	5	B+330 A 28+34	J6	189	63	42.21	III	Media
5	B+110 A 28+12	J4	27	48	72.79	II	Buena	5	B+340 A 28+35	J1	236	63	43.33	III	Media
5	B+120 A 28+13	J1	195	75	70.34	II	Buena	5	B+340 A 28+35	J2	279	90	44.11	III	Media
5	B+120 A 28+13	J2	144	52	64.31	II	Buena	5	B+340 A 28+35	J3	315	43	40.99	III	Media
5	B+120 A 28+13	J3	355	30	85.25	I	Muy Buena	5	B+340 A 28+35	J4	325	13	46.37	III	Media
5	B+130 A 28+14	J1	250	75	82.57	I	Muy Buena	5	B+340 A 28+35	J5	196	55	47.74	III	Media
5	B+130 A 28+14	J2	170	42	78.47	II	Buena	5	B+350 A 28+36	J1	268	72	42.39	III	Media
5	B+130 A 28+14	J3	27	48	83.44	I	Muy Buena	5	B+350 A 28+36	J2	324	65	42.06	III	Media
5	B+130 A 28+14	J4	66	77	79.45	II	Buena	5	B+350 A 28+36	J4	87	44	41.06	III	Media
5	B+130 A 28+14	J5	145	60	73.00	II	Buena	5	B+350 A 28+36	J5	127	45	45.99	III	Media
5	B+140 A 28+15	J1	152	62	68.01	II	Buena	5	B+350 A 28+36	J6	228	77	42.52	III	Media
5	B+140 A 28+15	J2	230	75	67.76	II	Buena	5	B+360 A 28+37	J1	274	69	41.00	III	Media
5	B+140 A 28+15	J3	342	60	67.71	II	Buena	5	B+360 A 28+37	J2	357	55	39.93	IV	Mala
5	B+140 A 28+15	J4	74	67	65.56	II	Buena	5	B+360 A 28+37	J3	297	42	42.38	III	Media
5	B+150 A 28+16	J1	210	80	49.11	III	Media	5	B+360 A 28+37	J4	127	53	39.49	IV	Mala
5	B+150 A 28+16	J2	155	28	50.91	III	Media	5	B+360 A 28+37	J5	80	59	44.48	III	Media
5	B+150 A 28+16	J3	343	73	50.57	III	Media	5	B+370 A 28+38	J1	131	50	50.52	III	Media
5	B+150 A 28+16	J4	100	78	54.84	III	Media	5	B+370 A 28+38	J2	81	71	48.00	III	Media
5	B+160 A 28+17	J1	226	76	51.50	III	Media	5	B+370 A 28+38	J3	232	51	51.92	III	Media
5	B+160 A 28+17	J2	123	69	51.17	III	Media	5	B+370 A 28+38	J4	283	42	49.17	III	Media
5	B+160 A 28+17	J3	76	15	48.73	III	Media	5	B+370 A 28+38	J5	225	83	53.22	III	Media
5	B+170 A 28+18	J1	193	64	51.52	III	Media	5	B+380 A 28+39	J1	315	84	50.72	III	Media
5	B+170 A 28+18	J2	239	71	57.90	III	Media	5	B+380 A 28+39	J2	236	87	50.14	III	Media
5	B+170 A 28+18	J3	39	7	50.18	III	Media	5	B+380 A 28+39	J3	227	39	53.65	III	Media
5	B+170 A 28+18	J4	360	60	56.37	III	Media	5	B+380 A 28+39	J4	172	51	51.85	III	Media
5	B+170 A 28+18	J5	71	61	51.33	III	Media	5	B+380 A 28+39	J5	305	42	51.94	III	Media
5	B+180 A 28+19	J1	196	66	55.51	III	Media	5	B+390 A 28+40	J1	130	51	57.25	III	Media
5	B+180 A 28+19	J2	238	78	54.91	III	Media	5	B+390 A 28+40	J2	231	79	56.91	III	Media
5	B+180 A 28+19	J3	27	34	56.76	III	Media	5	B+390 A 28+40	J3	320	42	56.99	III	Media
5	B+180 A 28+19	J4	324	57	52.02	III	Media	5	B+400 A 28+41	J1	124	63	54.74	III	Media
5	B+180 A 28+19	J5	125	62	50.80	III	Media	5	B+400 A 28+41	J2	236	77	54.69	III	Media
5	B+190 A 28+20	F1	235	86	62.56	II	Buena	5	B+400 A 28+41	J3	313	38	53.69	III	Media
5	B+190 A 28+20	J1	182	85	47.36	III	Media	5	B+410 A 28+42	J1	105	80	54.77	III	Media
5	B+190 A 28+20	J2	235	85	50.48	III	Media	5	B+410 A 28+42	J2	247	74	53.25	III	Media
5	B+190 A 28+20	J3	47	5	54.18	III	Media	5	B+410 A 28+42	J3	314	39	54.36	III	Media
5	B+190 A 28+20	J4	348	49	51.47	III	Media	5	B+410 A 28+42	J4	156	85	53.73	III	Media
5	B+190 A 28+20	J5	103	57	50.63	III	Media	5	B+420 A 28+43	J1	111	68	54.19	III	Media
5	B+200 A 28+21	J1	156	74	53.31	III	Media	5	B+420 A 28+43	J2	246	58	59.16	III	Media
5	B+200 A 28+21	J2	248	82	56.16	III	Media	5	B+420 A 28+43	J3	312	74	56.25	III	Media
5	B+200 A 28+21	J3	355	13	59.88	III	Media	5	B+420 A 28+43	J4	175	68	53.57	III	Media
5	B+200 A 28+21	J4	344	46	57.52	III	Media	5	B+430 A 28+44	J1	110	71	53.24	III	Media
5	B+200 A 28+21	J5	100	60	53.67	III	Media	5	B+430 A 28+44	J2	242	73	52.96	III	Media
5	B+210 A 28+22	J1	177	78	53.69	III	Media	5	B+430 A 28+44	J3	326	51	53.69	III	Media
5	B+210 A 28+22	J2	220	75	48.12	III	Media	5	B+430 A 28+44	J4	143	68	53.11	III	Media
5	B+210 A 28+22	J3	350	6	57.42	III	Media	5	B+440 A 28+45	J1	108	76	48.55	III	Media
5	B+210 A 28+22	J4	332	47	54.26	III	Media	5	B+440 A 28+45	J2	228	79	53.94	III	Media
5	B+210 A 28+22	J5	110	56	41.47	III	Media	5	B+440 A 28+45	J3	331	44	49.50	III	Media
5	B+220 A 28+23	J1	191	70	50.48	III	Media	5	B+440 A 28+45	J4	168	59	51.91	III	Media
5	B+220 A 28+23	J2	243	90	47.76	III	Media	5	B+440 A 28+45	J5	70	73	56.84	III	Media
5	B+220 A 28+23	J3	26	14	50.37	III	Media	5	B+450 A 28+46	J1	115	59	44.78	III	Media
5	B+220 A 28+23	J4	334	51	54.14	III	Media	5	B+450 A 28+46	J2	249	78	49.22	III	Media
5	B+220 A 28+23	J5	78	52	47.84	III	Media	5	B+450 A 28+46	J4	146	70	48.42	III	Media
5	B+230 A 28+24	J1	193	70	52.97	III	Media	5	B+450 A 28+46	J5	65	65	51.25	III	Media
5	B+230 A 28+24	J2	229	66	54.78	III	Media	5	B+460 A 28+47	J1	77	85	48.66	III	Media
5	B+230 A 28+24	J3	359	5	58.17	III	Media	5	B+460 A 28+47	J2	118	61	49.15	III	Media
5	B+230 A 28+24	J4	351	58	53.41	III	Media	5	B+460 A 28+47	J3	226	60	49.57	III	Media
5	B+230 A 28+24	J5	78	73	49.25	III	Media	5	B+460 A 28+47	J4	301	40	48.89	III	Media
5	B+240 A 28+25	J1	191	69	51.00	III	Media	5	B+460 A 28+47	J5	28	79	45.32	III	Media
5	B+240 A 28+25	J2	249	88	49.49	III	Media	5	B+470 A 28+48	J1	89	88	58.08	III	Media
5	B+240 A 28+25	J4	335	55	49.72	III	Media	5	B+470 A 28+48	J2	195	68	58.13	III	Media
5	B+240 A 28+25	J5	92	70	48.42	III	Media	5	B+470 A 28+48	J3	299	59	59.74	III	Media
5	B+250 A 28+26	J1	187	61	48.31	III	Media	5	B+480 A 28+49	J1	49	73	56.02	III	Media
5	B+250 A 28+26	J2	219	67	52.01	III	Media	5	B+480 A 28+49	J2	210	63	54.67	III	Media
5	B+250 A 28+26	J3	19	30	54.29	III	Media	5	B+480 A 28+49	J3	308	65	52.60	III	Media
5	B+250 A 28+26	J4	323	63	55.98	III	Media	5	B+480 A 28+49	J4	17	18	51.97	III	Media
5	B+250 A 28+26	J5	92	63	51.75	III	Media	5	B+490 A 28+50	J1	43	71	54.92	III	Media
5	B+260 A 28+27	J1	174	58	53.69	III	Media	5	B+490 A 28+50	J2	127	49	57.72	III	Media
5	B+260 A 28+27	J2	218	85	51.78	III	Media	5	B+490 A 28+50	J3	332	25	55.53	III	Media
5	B+260 A 28+27	J4	340	44	58.66	III	Media	5	B+500 A 28+51	J1	45	78	49.97	III	Media
5	B+260 A 28+27	J5	63	63	56.16	III	Media	5	B+500 A 28+51	J2	151	66	48.29	III	Media
5	B+270 A 28+28	J1	181	64	51.47	III	Media	5	B+500 A 28+51	J3	268	34	46.26	III	Media
5	B+270 A 28+28	J2	263	65	47.05	III	Media	5	B+510 A 28+52	J1	30	70	51.66	III	Media
5	B+270 A 28+28	J4	344	21	45.73	III	Media	5	B+510 A 28+52	J2	159	45	52.05	III	Media
5	B+270 A 28+28	J5	64	79	44.95	III	Media	5	B+510 A 28+52	J3	300	33	49.37	III	Media
5	B+280 A 28+29	J1	186	63	40.50	III	Media	5	B+530 A 28+54	J1	49	87	39.97	IV	Mala
5	B+280 A 28+29	J2	210	90	40.65	III	Media	5	B+530 A 28+54	J2	156	60	56.85	III	Media
5	B+280 A 28+29	J4	329	46	46.21	III	Media	5	B+530 A 28+54	J3	290	52	53.48	III	Media
5	B+280 A 28+29	J5	73	81	39.34	IV	Mala	5	B+540 A 28+55	J1	38	36	61.78	III	Buena
5	B+290 A 28+30	J1	163	55	60.61	II	Buena	5	B+540 A 28+55	J2	145	67	59.48	III	Media
5	B+290 A 28+30	J2	211	89	56.58	III	Media	5	B+540 A 28+55	J3	244	31	62.45	II	Buena
5	B+290 A 28+30	J3	216	2	57.9										

ZONA	ABSCISA	FAMILIA	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO O (°)	UZAMIENTO (°)	RMR	CLASE	CALIDAD	ZONA	ABSCISA	FAMILIA	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO O (°)	UZAMIENTO (°)	RMR	CLASE	CALIDAD
5	B+590 A 28+60	J1	52	78	62.38	II	Buena	6	B+660 A 28+60	J4	215	83	42.69	III	Media
5	B+590 A 28+60	J2	169	78	59.59	III	Media	7	B+670 A 28+68	J1	83	69	57.77	III	Media
5	B+590 A 28+60	J3	296	46	59.09	III	Media	7	B+670 A 28+68	J2	337	58	55.25	III	Media
5	B+590 A 28+60	J4	102	72	62.47	II	Buena	7	B+670 A 28+68	J3	273	7	55.81	III	Media
6	B+600 A 28+61	J1	29	54	53.49	III	Media	7	B+670 A 28+68	J4	211	88	54.99	III	Media
6	B+600 A 28+61	J2	143	53	49.84	III	Media	7	B+680 A 28+69	J1	75	80	53.25	III	Media
6	B+600 A 28+61	J3	259	40	54.28	III	Media	7	B+680 A 28+69	J2	330	65	54.83	III	Media
6	B+600 A 28+61	J4	194	86	50.37	III	Media	7	B+680 A 28+69	J3	154	50	51.50	III	Media
6	B+610 A 28+62	J1	50	69	54.81	III	Media	7	B+680 A 28+69	J4	235	90	51.32	III	Media
6	B+610 A 28+62	J2	170	46	55.58	III	Media	7	B+690 A 28+70	J1	50	6	52.13	III	Media
6	B+610 A 28+62	J3	287	58	55.95	III	Media	7	B+690 A 28+70	J2	297	51	50.50	III	Media
6	B+610 A 28+62	J4	215	89	53.32	III	Media	7	B+690 A 28+70	J3	148	42	51.44	III	Media
6	B+620 A 28+63	J1	315	50	57.76	III	Media	7	B+690 A 28+70	J4	221	59	46.87	III	Media
6	B+620 A 28+63	J2	156	62	57.60	III	Media	7	B+700 A 28+71	J1	62	85	50.60	III	Media
6	B+620 A 28+63	J3	250	74	52.61	III	Media	7	B+700 A 28+71	J2	312	55	51.09	III	Media
6	B+630 A 28+64	J1	37	58	54.06	III	Media	7	B+700 A 28+71	J3	117	52	50.88	III	Media
6	B+630 A 28+64	J2	170	34	50.51	III	Media	7	B+700 A 28+71	J4	176	42	47.68	III	Media
6	B+630 A 28+64	J3	285	56	56.28	III	Media	7	B+720 A 28+73	J1	30	84	50.19	III	Media
6	B+630 A 28+64	J4	235	84	49.80	III	Media	7	B+720 A 28+73	J2	315	50	49.50	III	Media
6	B+640 A 28+65	J1	56	43	60.39	II	Buena	7	B+720 A 28+73	J3	105	54	49.75	III	Media
6	B+640 A 28+65	J2	202	51	53.56	III	Media	7	B+720 A 28+73	J4	230	76	47.10	III	Media
6	B+640 A 28+65	J3	284	67	54.16	III	Media	7	B+730 A 28+74	J1	24	82	55.22	III	Media
6	B+640 A 28+65	J4	207	77	56.44	III	Media	7	B+730 A 28+74	J2	270	35	57.52	III	Media
6	B+650 A 28+66	J1	72	45	52.93	III	Media	7	B+730 A 28+74	J3	215	75	54.09	III	Media
6	B+650 A 28+66	J2	165	48	54.98	III	Media	7	B+740 A 28+75	J1	15	90	58.27	III	Media
6	B+650 A 28+66	J3	292	64	51.99	III	Media	7	B+740 A 28+75	J2	312	51	51.40	III	Media
6	B+650 A 28+66	J4	24	85	51.08	III	Media	7	B+740 A 28+75	J3	299	40	53.05	III	Media
6	B+660 A 28+67	J1	83	61	47.62	III	Media	7	B+750 A 28+76	J1	23	90	60.02	II	Buena
6	B+660 A 28+67	J2	135	55	43.58	III	Media	7	B+750 A 28+76	J2	323	51	59.42	III	Media
6	B+660 A 28+67	J3	305	67	43.69	III	Media	7	B+750 A 28+76	J3	111	41	55.28	III	Media

3/3