

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

TÍTULO

Aplicación de la metodología de análisis empírico Q Slope para evaluación de taludes en la provincia Bolívar, caso de estudio vía Guaranda - Echeandía

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN GEOTECNIA

Presentado por:

Darwin Benigno Yáñez Borja

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año - 2021

DEDICATORIA

Este trabajo dedico como homenaje de cariño a mi madre María que con su esfuerzo y sacrificio me dio la educación, con gran aprecio e infinito amor a mi hijo Fernando quien me inspira a seguir adelante cuando estoy caído.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial a mis padres por su apoyo incondicional quienes ayudaron a que esta investigación llegue a su final con éxito.

Mi gratitud al Doctor Luis Jordá, por su dirección científica durante la elaboración de este proyecto de investigación y por sus valiosos aportes.

Mi sincero agradecimiento a la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, por la organización de este programa de maestría, a cada uno de los profesores que compartieron sus enseñanzas y conocimientos día a día con mucha paciencia y sabiduría a lo largo de proceso de formación académico.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Darwin Benigno Yáñez Borja doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Darwin Benigno Yáñez Borja

EVALUADORES

Nombre profesor del curso
PROFESOR DE LA MATERIA

Luís Jordá Bordehore
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En las últimas décadas, la clasificación de macizos rocosos ha sido usada en diferentes proyectos de ingeniería tales como: túneles, taludes y cimentaciones, sugeridos por investigadores para evaluar la estabilidad de taludes en roca. Algunos métodos empíricos como el Q Slope ayudan a predecir el soporte y esfuerzo de taludes excavados en roca proporcionando la orientación en relación con el ángulo de pendiente estable a largo plazo. El Q Slope emplea los siguientes parámetros para su análisis: índice de calidad de la roca (RQD), número de familias de juntas (J_n), factor de rugosidad de juntas (J_r), factor de alteración de juntas (J_a), condiciones ambientales y geológicas (J_{wice}), factor de reducción de la resistencia del talud ($\text{SRF}_{\text{slope}}$).

La vía Guaranda – Echeandía ha tenido varias afectaciones por deslizamientos provocados por la inestabilidad de taludes, volviéndose recurrentes año tras año paralizando la libre circulación vehicular, incluso hay reportes de pérdidas humanas.

Esta investigación se enfoca en la evaluación de taludes a través de un método empírico, y en el análisis de estabilidad de taludes por medio de la clasificación geomecánica. El objetivo principal del trabajo es clasificar geomecánicamente seis taludes en la vía Guaranda – Echeandía usando el método empírico Q Slope.

Esta investigación está conformada por dos fases, la primera corresponde a la fase de campo donde se realizó el levantamiento de parámetros geotécnicos para la caracterización geomecánica, identificando el número de familias de discontinuidad, índice de diaclasado, índice de rugosidad, índice de alteración, factor de reducción por agua y factor de reducción por condiciones de superficie, esfuerzos y orientación. Adicionalmente, se determinó el ángulo de fricción básico mediante el ensayo tilt-test.

En la segunda fase, que comprendió el trabajo de gabinete, se desarrolló el procesamiento y análisis de información utilizando el software DIPS, el mismo que permitió identificar los distintos tipos de fallas que afectan la estabilidad de los taludes.

Los resultados obtenidos arrojaron valores de ángulos de inclinación desde 10 hasta 37 grados. Los análisis de calidad de la roca (RQD) determinaron que los macizos rocosos evaluados son de calidad media a buena. El cálculo de estabilidad con el método Q Slope reportó inestabilidad para cinco de los seis taludes analizados y solo uno cumple con las condiciones para ser estable. Por otro, el análisis cinemático determinó la predominancia de ruptura tipo cuña seguida de la ruptura tipo vuelco, y en menor proporción se encontró a la ruptura planar.

En términos generales, se concluye que el macizo rocoso presenta variabilidad en el índice de calidad de la roca (RQD), los métodos de fallo estructural controlados por las discontinuidades son determinados por el porcentaje de probabilidad de ocurrencia de una falla, otro de los factores que influye en la estabilidad de taludes en este tramo vial es la constante precipitación y la temperatura que aceleran los procesos de meteorización y reducen la calidad del material rocoso expuesto, la caracterización del grado de estabilidad de los taludes en la vía Guaranda – Echeandía se aplicó en taludes que tiene alturas que no superan los 30 m.

Palabras clave: macizo rocoso, Q Slope, caracterización geomecánica, proyección estereográfica.

ABSTRACT

In the last decades, the classification of rock masses has been used in different engineering projects such as tunnels, slopes, and foundations, suggested by researchers to evaluate the stability of rock slopes. Some empirical methods such as the Q Slope, help to predict the support and stress of rock slopes by providing the orientation in relation to the long-term stable slope angle. The Q Slope employs the following parameters for its analysis: rock quality index (RQD), number of joint families (Jn), joint roughness factor (Jr), joint alteration factor (Ja), environmental and geological conditions (Jwice), slope strength reduction factor (SRF_{slope}).

The Guaranda - Echeandía road has been affected by several landslides caused by slope instability, becoming recurrent year after year, stopping the free circulation of vehicles, and there have even been reports of human losses.

This research focuses on evaluating slopes through an empirical method and on the analysis of slope stability using geomechanical classification. The main objective of the work is to classify geomechanically six slopes in the Guaranda - Echeandía road using the empirical Q Slope method.

This research is composed of two phases, the first one corresponds to the field phase where the geotechnical parameters for the geomechanical characterization were collected, identifying the number of discontinuity families, diaclasses index, roughness index, alteration index, reduction factor by water and reduction factor by surface conditions, stresses, and orientation. Additionally, the basic friction angle was determined by using the tilt-test.

In the second phase, which included desk work, information was processed and analyzed using DIPS software, which allowed the identification of the different types of faults that affect slope stability.

The results obtained showed values of slope angles from 10 to 37 degrees. The rock quality analysis (RQD) determined that the rock masses evaluated are of medium to good

quality. The stability calculation with the Q Slope method reported instability for five of the six slopes analyzed, and only one meets the conditions to be stable. On the other hand, the kinematic analysis determined the predominance of wedge-type failure followed by toppling-type failure, and in a smaller proportion, planar failure was found.

In general terms, it is concluded that the rock mass presents variability in the rock quality index (RQD), the methods of structural failure controlled by the discontinuities are determined by the percentage of probability of occurrence of a fault, another factor that influences slope stability in this road section is the constant precipitation and temperature that accelerate the weathering processes and reduce the quality of the exposed rock material. The characterization of the slope stability degree in the Guaranda - Echeandía road was applied in slopes that have heights not exceeding 30 m.

Key words: rock mass, Q Slope, geomechanical characterization, stereographic projection.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Justificación del problema	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Información relacionada al área de estudio	5
1.5.1. Generalidades	5
1.5.2. Ubicación geográfica.....	5
1.5.3. Demarcación política.....	6
1.5.4. Topografía.....	6
1.5.5. Clima	6
1.6. Fundamentación teórica.....	7
1.6.1. Tectónica.....	7
1.6.2. Geología.....	8
1.6.2.2. Geología regional	10
1.6.2.2.1. Unidad Macuchi (KM) - Paleógeno - Eoceno Temprano - Medio ..	10
1.6.2.2.2. Volcánicos Cuaternarios (Qv).....	10
1.6.3. Clasificación geomecánica.....	11
1.6.3.1. Q Slope.....	11
1.6.3.2. Prueba Tilt-Test	12
1.6.4. Modelo de falla	12
1.6.4.1. Fallas con control estructural	13
1.6.4.1.1. Rotura plana	13
1.6.4.1.2. Rotura por cuña.....	13
1.6.4.1.3. Rotura por vuelco (toppling)	13
1.6.4.2. Fallas sin control estructural	14
1.6.4.2.1. Caída de rocas	14

1.6.4.2.2. Falla circular	14
2. METODOLOGÍA	15
2.1. Fase de campo	15
2.1.1. Caracterización geomecánica	15
2.1.2. Discontinuidades	17
2.1.3. Descripción de las discontinuidades	17
2.1.3.1. Índice de diaclasado (J_n)	18
2.1.3.2. Índice de rugosidad (J_r)	19
2.1.3.3. Índice de alteración (J_a).....	21
2.1.3.4. Factor de reducción por agua J_w	23
2.1.3.5. Factor de reducción por condiciones de superficie, esfuerzos y orientación de discontinuidades SRF_{slope}	23
2.1.3.6. Ensayo para determinar la fricción básica de la discontinuidad.....	25
2.1.3.7. Toma de datos para el ensayo Tilt-Test.....	27
2.2. Fase de gabinete	29
2.2.1. Análisis cinemático	29
2.2.1.2. Determinación del ángulo de fricción residual	31
2.2.1.3. Determinación del ángulo de fricción básico.....	31
2.2.2. Determinación del RQD.....	31
2.2.3. Determinación del Q Slope.....	32
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	33
3.1. Resultados.....	33
3.1.1. Cálculo del ensayo Tilt test.....	33
3.1.2. Estaciones geomecánicas.....	35
3.1.2.1. Estación 01 (Talud 1).....	35
3.1.2.2. Estación 02 (Talud 2).....	38
3.1.2.3. Estación 03 (Talud 3).....	41
3.1.2.4. Estación 04 (Talud 4).....	44
3.1.2.5. Estación 05 (Talud 5).....	47
3.1.2.6. Estación 06 (Talud 6).....	49
3.1.3. Cálculo del RQD (Rock Quality Designation)	52
3.1.4. Cálculo del Q Slope.....	53

3.2. Análisis de estabilidad	55
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
4.1. Conclusiones.....	57
4.2. Recomendaciones	59

ABREVIATURAS

Ja	Índice de alteración
Jn	Índice de diaclasado
Jr	Índice de rugosidad
JRC	Coeficiente de rugosidad
Jw	Factor de reducción por agua
Jwice	Condiciones ambientales y Geológicas
km	kilómetros
KM	Unidad Macuchi
mm	Milímetros
MRMR	Mining Rock Mass Rating
m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar
Qv	Volcánicos cuaternarios
RQD	Rock Quality Designation
SRF_{slope}	Factor de reducción por esfuerzos
SRFa	Condición física
SRFb	Tensión y resistencia
SRFc	Discontinuidades mayores
SRM	Slope Mass Rating
UTM	Universal Transversa de Mercator

SIMBOLOGÍA

$^{\circ}$	Grado sexagesimal
$^{\circ}C$	Grado centígrado
φ_b	Ángulo de fricción básico
φ_r	Ángulo de fricción residual
r	Rebotes más bajos del martillo Schmidt
R	Rebotes más altos del martillo Schmidt
α	Ángulo de inclinación
β	Ángulo de máxima pendiente
\log_{10}	Logaritmo sub-base 10
JCS_0	Coefficiente de rugosidad
σ_{n_0}	Tensión normal sobre la discontinuidad
λ	Número de discontinuidades por metro
W	Peso del bloque
cm^2	Centímetro cuadrado
MN	Mega Newton
m^2	Metro cuadrado
g	Gramo
MPa	Megapascal

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Mapa de ubicación del área de estudio, provincia Bolívar (Yáñez, 2021).	6
Figura 1.2.	Mapa geológico del área de estudio (Yáñez, D. 2021).....	9
Figura 2.1.	Medición mediante brújula de la orientación de un talud (Yáñez, 2021).	16
Figura 2.2.	Familias de diaclasas en la vía Guaranda - Echeandía (Yáñez, 2021).	17
Figura 2.3.	Determinación del número de discontinuidades por metro (Yáñez, 2021).	18
Figura 2.4.	Identificación de familias de juntas (Yáñez, 2021).	19
Figura 2.5.	Caracterización del índice de rugosidad línea de color rojo (Yáñez, 2021).	20
Figura 2.6.	Perfiles normalizados para la obtención del JRC. Nótese que la escala es 10 cm (Barton y Choubey, 1997).....	21
Figura 2.7.	Prueba de inclinación (Yáñez, 2021).....	26
Figura 2.8.	Izquierda elección del bloque a ensayar; derecha prueba de rebote esclerómetro (Yáñez, 2021).	27
Figura 2.9.	Izquierda peso del bloque superior; derecha área de contacto (Yáñez, 2021).	28
Figura 2.10.	Izquierda deslizamiento del bloque superior; derecha lectura del ángulo de inclinación (Yáñez, 2021).	29
Figura 2.11.	Representación estereográfica obtenida con el software Dips en el Talud uno (Yáñez, 2021).	30
Figura 2.12.	Número de discontinuidades intersectadas por metro lineal. (Yáñez, 2021).	32
Figura 3.1.	Análisis estereográfico del Talud 1, muestra falla tipo cuña (Yáñez, 2021).	36
Figura 3.2.	Análisis estereográfico del Talud 1, presenta falla tipo vuelco (Yáñez, 2021).	37
Figura 3.3.	Estación geomecánica 01 (Yáñez, 2021).....	38
Figura 3.4.	Análisis estereográfico del Talud 2, presenta falla tipo cuña (Yáñez, 2021).	39

Figura 3.5.	Análisis estereográfico del Talud 2, presenta fallas tipo vuelco directo (Yáñez, 2021).	40
Figura 3.6.	Estación geomecánica 02 (Yáñez, 2021).	41
Figura 3.7.	Análisis estereográfico del Talud 3, presenta fallas tipo planar (Yáñez, 2021).	42
Figura 3.8.	Análisis estereográfico del Talud 3, fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).	43
Figura 3.9.	Estación geomecánica 03 (Yáñez, 2021).	44
Figura 3.10.	Análisis estereográfico del Talud 4, presenta fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).	45
Figura 3.11.	Análisis estereográfico del talud 4, presenta fallas tipo vuelco (Yáñez, 2021).	46
Figura 3.12.	Estación geomecánica 04 (Yáñez, 2021).	47
Figura 3.13.	Análisis estereográfico del Talud 5, presenta fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).	48
Figura 3.14.	Estación geomecánica 05 (Yáñez, 2021).	49
Figura 3.15.	Análisis estereográfico del Talud 6, presenta fallas de tipo planar (Yáñez, 2021).	50
Figura 3.16.	Análisis estereográfico del Talud 6, presenta fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).	51
Figura 3.17.	Estación geomecánica 06 (Yáñez, 2021).	52
Figura 3.18.	Gráfico de estabilidad de taludes usando el sistema Q Slope (Bar and Barton 2017).	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Datos de dirección y buzamiento (Yáñez, 2021)	16
Tabla 2.2.	Valores del índice de alteración J_a (Karzulovic Antonio, 2002).	22
Tabla 2.3.	Número de la condición geológica y ambiental. Modificado por Barton y Bar 2017 (Vergara Emilio, 2020).	23
Tabla 2.4.	SRFa Condición física. Modificado de Barton y Bar 2017 (Vergara Emilio, 2020).	24
Tabla 2.5.	Clasificación de estrés y fuerza del talud. Modificado de Barton y Bar (2017) (Vergara Emilio, 2020).	24
Tabla 2.6.	Condición de la mayor discontinuidad. Modificado de Barton y Bar (2017) (Vergara Emilio, 2020)	24
Tabla 3.1.	Resultados del ensayo tilt test (Yáñez, 2021).	34
Tabla 3.2.	Resumen de resultados del índice de calidad de la roca (Yáñez, 2021)...	52
Tabla 3.3.	Cálculo de Q Slope, ángulo del talud y evaluación de la estabilidad (Yáñez, 2021).	54
Tabla 3.4.	Resultados de probabilidad de ruptura según el software Dips (Yáñez, 2021).	56

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el concepto de clasificación de macizos rocosos se aplica ampliamente en el diseño de ingeniería de diferentes proyectos como túneles, taludes y cimentaciones. Muchos investigadores han propuesto o utilizado sistemas de clasificación de macizo rocoso como método experimental para evaluar la calidad de la roca o la estabilidad de laderas rocosas, por ejemplo; (Bieniawski Z, 1973); Barton (1974); Selby (1980); Haines y Terburgge (1991); Hack et al. (2003); Lui y Chen (2007); Pantelidis (2010); y Hajiazizi y Khatami (2013).

En los últimos 50 años se han desarrollado varios métodos empíricos para ayudar al diseño de ingeniería de rocas, los ingenieros geólogos y de rocas lo usan para un sin número de aplicaciones, principalmente para la construcción de túneles y el soporte de excavaciones subterráneas. En caso de taludes rocosos, algunos métodos empíricos predicen el soporte, refuerzo y desempeño de taludes excavados. Sin embargo, aparte de Q Slope, ningún método empírico de ingeniería de rocas proporciona orientación en relación con ángulos de pendiente estables a largo plazo apropiados en los que el refuerzo y el soporte están deliberadamente ausentes (Bar Neil & Barton Nick, 2018).

La aplicación de métodos empíricos para la cuantificación del macizo rocoso tiene un historial bastante largo que se remonta al trabajo de Ritter, (1879). Terzaghi presento la primera clasificación cuantitativa con túneles de estructura de acero en condiciones de roca huésped y diseños de soporte *Terzaghi (1946) (Mohammad Azarafza et al., 2020)*.

Los métodos empíricos son rápidos y eficientes para comprender y abordar los problemas de inestabilidad de las pendientes. La clasificación Slope Mass Rating (SMR) es un sistema de clasificación ampliamente utilizado que permite comprender el grado de estabilidad predominante. Un concepto relativamente nuevo de caracterización de rocas por el método Q Slope está tomando gran popularidad en las investigaciones de

estabilidad de taludes particularmente en Estados Unidos, Australia, España, Europa y en algunos países del Medio Oriente (Siddique Tariq et al., 2015).

El método Q-Slope (Barton & Bar, 2015) se diseñó para usarse en cortes de caminos de acceso a sitios sin refuerzos, rieles o bancos individuales en minas a cielo abierto, no es aplicable a la evaluación de estabilidad en grandes pendientes generadas por varios niveles de excavación en diferentes periodos de tiempo, como rampas o pendientes generales en minas a cielo abierto (Bar Neil & Barton Nick, 2016)

La entrada de resistencia al corte es similar al sistema Q Slope, pero más crítica, ya que las cuñas no están confinadas y la dilatación es menos importante que alrededor de los túneles, ya que generalmente no hay un aumento en la tensión y rigidez normal cuando se inicia el corte. Las discontinuidades rellenas siguen el mismo esquema de contacto que antes:

- Contacto de roca a roca.
- Contacto de roca a roca después de un desplazamiento de cizallamiento.
- Sin contacto de roca a roca debido a rellenos de arcilla gruesa.

Q Slope usa los mismos seis parámetros RQD, Jn, Jr, Ja, Jw y SFR. Sin embargo, el parámetro de resistencia a la fricción Jr y Ja puede aplicarse, cuando sea necesario, a los lados individuales de cuñas potencialmente inestables utilizando factores de orientación simples (Bar Neil & Barton Nick, 2017).

1.1. Antecedentes

El Ministerio de Obras Públicas de la provincia de Bolívar informó que el día 29 de marzo de 2019 se registró un deslizamiento en el km 22 de la vía Guanujo - Echeadía comprometiendo 20 m lineales de esta vía de acceso que une la Sierra con el Subtropico de la provincia.

El miércoles 12 de abril de 2017 un derrumbe en el km 14 de la vía Guanujo - Echeadía arrastró una pala mecánica por material que cayó de la parte alta del talud, técnicos del MTOP cerraron la vía para evaluación del comportamiento del talud y garantizar la seguridad de los usuarios.

Los esquemas de clasificación geomecánica se han empleado más de 100 años desde que Ritter (1879) intentó formalizar una aproximación empírica para el diseño de túneles (Hoek 2007). Estos sistemas de clasificación de macizos rocosos son de gran ayuda en las etapas preliminares de un proyecto cuando no se dispone de suficientes datos (Hoek 2007). Las clasificaciones geomecánicas se hicieron más populares después de la década de 1970, con el establecimiento de Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski y el índice Q de Barton Nick et al., 1974.

La principal aplicación y desarrollo de RMR y Q-index fue para el diseño previo de obras subterráneas como túneles, minas y cavernas (Barton y Bieniawski 2008). La clasificación RMR, aunque inicialmente se aplicó a obras subterráneas, contó con factores de corrección para pendientes y cimentaciones (Bieniawski 1989). Sin embargo, el factor de corrección para pendientes fue casi imposible de aplicar debido al rango extremo de factores de corrección y la falta de definición de factores en la práctica (Romana M et al., 2015).

Se han aplicado variaciones de la clasificación RMR a los taludes como la clasificación Mining Rock Mass Rating (MRMR) para taludes mineros de ingeniería civil (Romana, 1985); estos son los más utilizados en la práctica. Hay otras clasificaciones de pendientes, pero la mayoría siguen siendo poco conocidas y se han restringido a países y ambientes geológicos específicos: Resistencia del Macizo rocoso (RMS Selby 1980), Clasificación de la Masa de Roca de Pendiente (SRMR), (Robertson 1988), Clasificación de Masa de Pendiente en China.

1.2. Descripción del problema

En los últimos años, en la vía Guaranda – Echeandía se han presentado diversos deslizamientos que han inhabilitado la vía de accesos afectando la libre circulación vehicular inclusive provocando pérdidas humanas. La falta de una evaluación de las condiciones de los taludes y un adecuado estudio, diseño y tizado de estos conllevan a incurrir en esta problemática.

A pesar de los avances y planificaciones existentes por parte de las instituciones competentes se requiere una herramienta de diagnóstico rápido y efectivo que permita

evaluar las condiciones de la infraestructura vial de toda la provincia con el objetivo de reducir los riesgos de deslizamientos en taludes que se encuentran en malas condiciones o no tiene un diseño adecuado.

Por estas circunstancias es de mucha utilidad contar con una metodología de fácil manejo como es el caso del Q Slope un método empírico que efectúa un análisis geológico estructural del sitio de estudio enfocado al planteamiento de posibles soluciones que reducen el riesgo de inestabilidad de taludes y reptación que afectan en tramos puntuales de la vía Guaranda - Echeandía.

1.3. Justificación del problema

Esta investigación se orienta en la evaluación de la estabilidad de taludes a través de un método empírico tomando como base parámetros geológicos y geotécnicos del macizo rocoso en la vía Guaranda - Echeandía. El análisis de estabilidad de taludes tiene como objetivo principal clasificar geomecánicamente seis taludes de tal manera que se pueda determinar medidas de prevención y mitigación disminuyendo el riesgo de inestabilidad.

Este proyecto aportará con una metodología empírica para el análisis de taludes en roca, identificando factores desencadenantes que influyen en la estabilidad de los cortes al momento de realizar construcciones viales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Clasificar geomecánicamente seis taludes rocosos en la vía Guaranda – Echeandía usando la metodología de análisis empírico Q Slope.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la estabilidad de los taludes aplicando la metodología Q Slope.
- Verificar la aplicabilidad de los gráficos empíricos existentes.

1.5. Información relacionada al área de estudio

1.5.1. Generalidades

El área de estudio está localizada en la sierra centro de Ecuador, específicamente al noroeste de la provincia Bolívar, en la vía que conecta el cantón Guaranda con el cantón Echeandía. La vía tiene una longitud aproximada de 60 km, pertenece a una vía colectora de código E494, y une la Sierra con el Subtropico de la provincia como se muestra en la figura 1.1.

1.5.2. Ubicación geográfica

Los límites geográficos del tramo vial lo conforman las coordenadas UTM WGS 84 zona 17 sur; 721429 E/ 9828129 N (Punto de inicio) y 691412 E/ 9850116 N (Punto final).

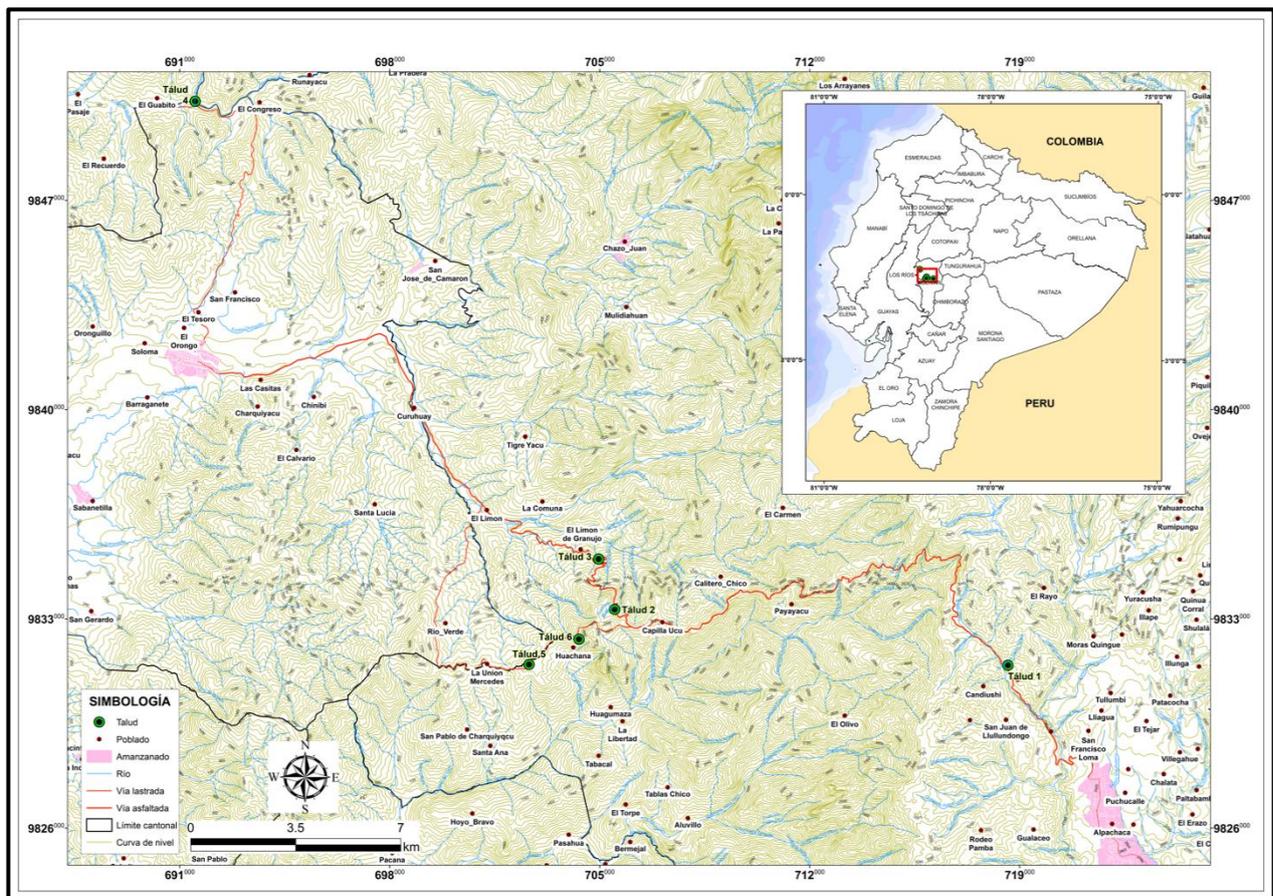


Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio, provincia Bolívar (Yáñez, 2021).

1.5.3. Demarcación política

El cantón Guaranda está limitado al norte con el cantón Pangua y Pujilí de la provincia de Cotopaxi, al sur con los cantones Colta y San Miguel de las provincias de Chimborazo y Bolívar respectivamente, al este con los cantones Ambato de la provincia de Tungurahua y Riobamba de la provincia de Chimborazo y al Oeste con los cantones Las Naves, Echeadía y Caluma de la provincia Bolívar.

1.5.4. Topografía

El relieve del cantón Guaranda es accidentada en su zona interandina, por la existencia de la Cordillera Occidental de los Andes y el ramal de la cordillera de Chimbo, presenta pequeños valles en las parroquias: Guanujo, San Simón, en San Luís de Pambil se evidencia un gran valle ya que la inclinación del terreno disminuye en la zona subtropical del cantón (Sánchez López, 2020).

1.5.5. Clima

El cantón Guaranda posee una variedad de climas y microclimas, que va desde el páramo hasta la zona subtropical. La distribución de las lluvias varía de una zona a otra, el INAMHI reporta una precipitación media anual entre 500 a 2000 mm en la zona alta del cantón (páramo), mientras que para la zona subtropical los valores de lluvia media anual están entre 2000 a 3000 mm anual (GAD cantonal, 2018).

Por la ubicación geográfica el cantón Guaranda, presenta fuertes descensos de temperatura que van desde la zona andina hasta el llano piedemonte. En el páramo la temperatura media anual es de 7 °C y en el subtrópico o zona baja es de 22 °C, las temperaturas más bajas reportadas en la zona alta comienzan en noviembre y duran hasta abril, mientras que los meses más cálidos empiezan en mayo y finalizan en octubre (GAD cantonal, 2018).

El clima que predomina en el cantón Echeandía es tropical megatérmico húmedo, tiene características típicas de zonas que limitan entre la sierra y la Amazonía, se presenta en altitudes entre los 500 y 1500 m.s.n.m. Se registra precipitaciones de 2000 a 4000 mm durante todo el año generando una sola estación lluviosa, la temperatura varía según la altitud; la vegetación es casi selvática (GAD cantonal, 2014)

1.6. Fundamentación teórica

1.6.1. Tectónica

Estudios de geofísica y geoquímica en los últimos 50 años han determinado que la tierra está formada por cuatro capas concéntricas principales: litósfera, astenósfera, mesósfera y endosfera. Al disminuir la escala de nuestra perspectiva y centrarnos en las costas del Océano Pacífico, se puede entender cuáles fueron las fuerzas dinámicas que hacen que el Ecuador se localice en el denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico” donde la placa de Nazca se hunde (o se subduce) bajo la placa Sudamericana a una velocidad de 60 mm/año y con una dirección aproximada este-oeste (Rivadeneira Francisco et al., 2007).

En la región costera de Ecuador el régimen de esfuerzos se encuentra dominado por una extensión N-S (Dumont et al. 1997), debido a un escape lateral del bloque norandino hacia el norte, o localmente a un aumento de la oblicuidad de la convergencia hacia el norte, desde el golfo de Guayaquil hacia Colombia (Ego 1995). La subducción de la dorsal de Carnegie durante el Pleistoceno inferior y medio es un parámetro importante del levantamiento costero y de la tectónica en extensión de esta zona (Lavenu Alain, 2006).

Varias superficies de abrasión cuaternarias cuyas altitudes varían de 7 m a más de 300 m (Cantalamessa y Di Celma 2004, se aprecia entre el golfo de Guayaquil y Esmeraldas y sugieren una tasa máxima de levantamiento de alrededor de 0.2 mm/año durante el cuaternario. Tierra adentro, el triángulo formado por el bloque norandino acomoda la deformación en el punto triple entre las placas de Nazca, Caribe y Sudamérica, en la extremidad sur del bloque costero ecuatoriano, que coincide con la extremidad sur del bloque norandino, el golfo de Guayaquil se abre debido al desplazamiento dextral del bloque costero en relación con la placa continental de América del Sur (Deniaud et al. 1999, Witt et al. 2005), Lavenu Alain, 2006.

Durante los últimos 1.75 a 2 ma el bloque costero se movió con una tasa de $\sim 1 \text{ cm.a}^{-1}$ (Trenkamp et al. 2002). Este movimiento se acomoda en el continente a lo largo de falla Pallatanga, que bordea hacia el norte de la depresión Interandina (localizada entre las cordilleras Occidental y Oriental) y más al norte a lo largo de otros segmentos de fallas como la de Chingual-La Sofía, en la zona fronteriza entre Ecuador y Colombia. Hacia el sur, la falla de Pallatanga se extiende en el golfo de Guayaquil en un sistema de fallas normales y de rumbo. La tasa de extensión mínima para la abertura del golfo de Guayaquil durante el cuaternario se ha calculado en $2.5 \pm 1.1 \text{ mm.a}^{-1}$ (Lavenu et al. 1995) hasta una tasa de 6.8 a 9 mm.a^{-1} (Santana et al. 2003), (Lavenu Alain, 2006).

1.6.2. Geología

El estudio realizado por Luís Escorza (1993) menciona que la ciudad de Guaranda, se localiza en la denominada zona de “Depresión Guaranda”, la misma que está limitada por tres fallas geológicas; desde la más antigua tenemos: la falla del río Salinas, que es una extensión del río Chimbo, presenta un rumbo norte - sur y esta falla a su vez se considera como un ramal de la falla regional Puná - Pallatanga - Riobamba; la falla del río Guaranda o falla Illangama - Guaranda que se localiza paralela a la cordillera de Chimbo al flanco oeste de la cordillera Occidental; la falla de Negroyacu, como consta en el esquema tectónico de la depresión Guaranda (Escorza, 1993).

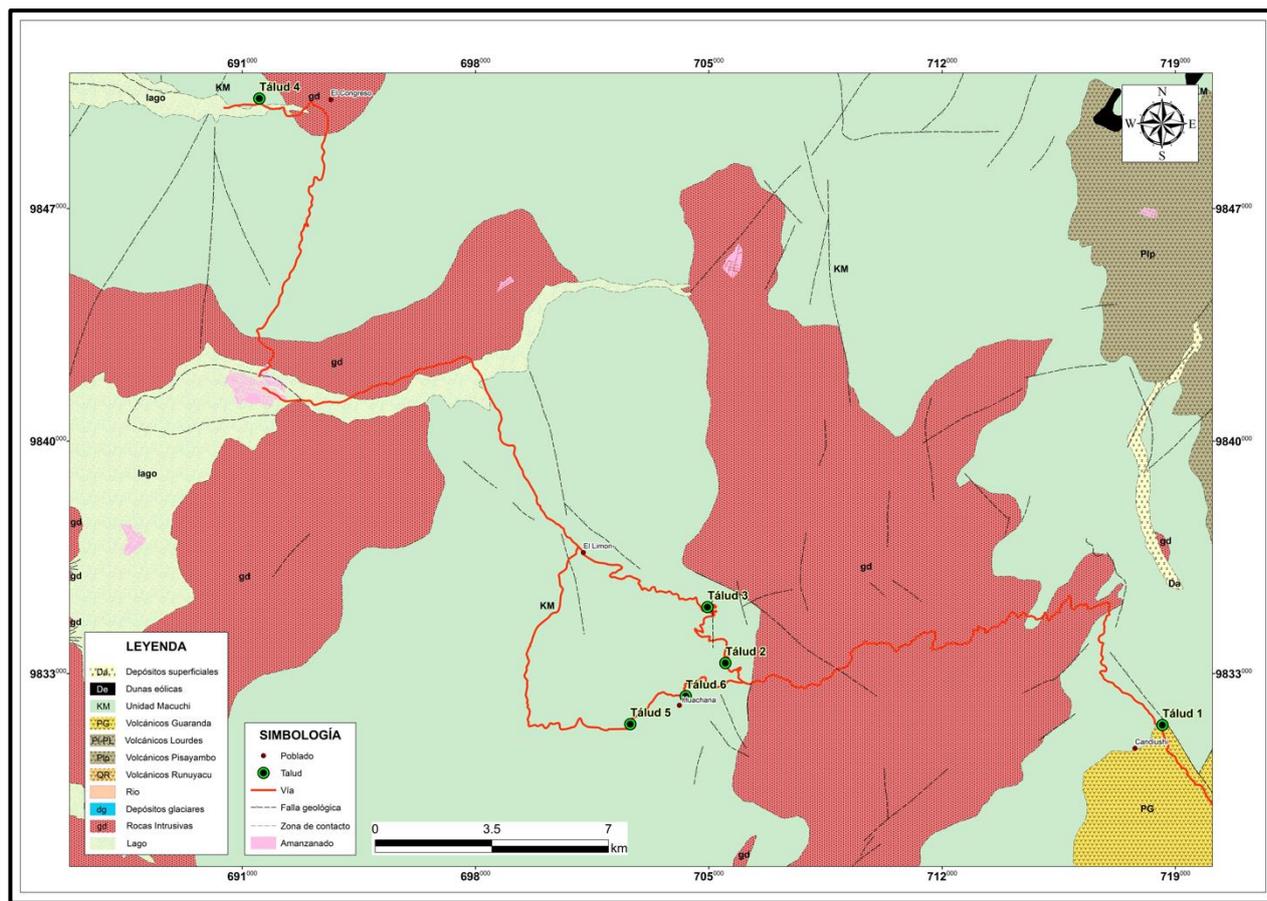


Figura 1.2. Mapa geológico del área de estudio (Yáñez, D. 2021).

Debido al proceso de subducción de las placas de Nazca y Sudamericana; Escorza, plantea que “todo el valle del río Chimbo sea una posible sutura de subducción o una depresión del Oligoceno superior, producto de una tectónica compresiva; pero la depresión de Guaranda específicamente es producto de un evento tectónico del Neógeno, es decir de las últimas fases del levantamiento de los Andes” (Escorza L, 1993).

La depresión de Guaranda es un bloque tectónico acuñado, los esfuerzos horizontales vinieron desde el este, al levantarse el macizo de Coshuna; dando origen a la falla del río Guaranda. Al acumular esfuerzos compresionales el bloque acuñado fue tectonizado, formando bloques, unos se levantaron y otros se hundieron, este fenómeno le dio el carácter de depresión y la presencia de colinas en Guaranda (Escorza L, 1993)

1.6.2.2. Geología regional

La geología regional que encontramos a lo largo de vía Guaranda - Echeandía se presenta a continuación:

1.6.2.2.1. Unidad Macuchi (KM) - Paleógeno - Eoceno Temprano - Medio

Esta formación toma su nombre del pequeño pueblo de Macuchi en la ruta La Maná - Latacunga, que en su área tipo. Predomina el oeste de las estribaciones occidentales de la Cordillera Occidental. Esta intruída y localmente metamorfozada por un grupo de plutones, cuya edad varía de 35 a 14 ma.

En la parte occidental está en contacto con depósitos cuaternarios y en la parte oriental, con una serie de depósitos que tienen una edad desde eocénica a cuaternaria. Sobreyacida por la Unidad Arrayanes en la parte suroriental.

Está conformada por: areniscas volcánicas de grano grueso, brechas, tobas, hialoclastitas, limolitas volcánicas, microgabros y diabasas, basaltos subporfidíticos, lavas en almohadillas y escasas calcarenitas. Estas rocas son el producto de actividad volcánica efusiva submarina, mezclados con materiales retrabajados que fueron depositados por procesos de flujo de masas (BSG-CODIGEM, 1993). La facie sedimentaria consiste en debritas escasamente sorteadas, areniscas turbidíticas y hialoclastitas intercaladas con delgados lentes de brechas matriz soportadas, areniscas de composición basáltica y capas delgadas de calizas (Hughes Richard & Pilatasig Luís, 2002)

1.6.2.2.2. Volcánicos Cuaternarios (Qv)

Según Aspden et al., 1997, estos depósitos volcánicos comprenden los conocidos como Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi, Carihuirazo, Guaranda, Palmira, Cangahua, de los cuales se describe a los depósitos volcánicos denominados Guaranda, debido a que son los únicos que se encuentran en el área de estudio.

Los depósitos volcánicos Guaranda son una serie de tobas andesíticas de color café y grano fino, intercaladas con lavas andesíticas porfiríticas, recubiertas por depósitos

periclinales de ceniza y pómez probablemente consolidados. La edad sugerida para estos depósitos es pleistocénica (McCourt J et al., 1997)

1.6.3. Clasificación geomecánica

Hay varios métodos que se han desarrollado para la clasificación de macizos rocosos, los cuales ayudan en la toma de decisiones para la ejecución de obras civiles. Estos métodos se fundamentan en las características físico-mecánicas de las rocas, las condiciones hidrogeológicas y el entorno geotécnico. Su desarrollo es empírico y se basa en experiencias obtenidas en varios proyectos de construcción civil. En su gran mayoría se orientan a la excavación de obras subterráneas (Cervantes José, 2003).

Estos métodos son herramientas muy prácticas para evaluar las condiciones de un macizo rocoso, su aplicación busca una simplificación de las variables que influyen en el comportamiento de las rocas bajo los efectos de cambios originados en el desarrollo civil (Cervantes José, 2003).

Uno de los problemas que se acarrea con estos métodos es que se necesita experiencia para poder evaluar los resultados que se obtiene. La aplicación aritmética es sencilla, no obstante interpretar el valor final puede ingresar una variable subjetiva. Los métodos primero como evaluador son buenos, pero se debe de tener mucho cuidado con su aplicación final en el diseño y la toma de decisiones (Cervantes José, 2003).

1.6.3.1. Q Slope

El sistema de clasificación Q Slope se compone de seis parámetros igual que el sistema Q estándar como son: RQD, Jn, Jr, Ja, Jw y SRF, pero para usar el Q Slope se han modificado como RQD, Jn, Jr, Ja, Jwice y SRFslope Barton y Bar, (2015). Bar y Barton (2017) presentan la ecuación de Q Slope para evaluación de estabilidad de pendientes como:

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (1.1)$$

Donde:

RQD	= Índice de calidad de roca.
J_n	= Índice de diaclasado.
J_r	= Índice de rugosidad.
J_a	= Índice de alteración.
O	= Factor de orientación de las discontinuidades.
J_{wice}	= Condiciones ambientales y geológicas.
SRF_{slope}	= Factor de reducción por esfuerzos.

1.6.3.2. Prueba Tilt-Test

El ensayo de inclinación o “tilt-test” es una referencia para obtener la fricción básica de la discontinuidad. Este parámetro es muy importante en la determinación de la fricción residual y de pico de una discontinuidad en el criterio de *Barton - Bandis (1990)* (*Jordá-Bordehore Luís & Herrera Raquel, 2018*).

En la práctica no siempre se realiza este ensayo y en la formulación recurrimos a tablas donde encontrar los parámetros de fricción básica del material objeto de análisis. El problema radica en que muchos materiales, no están tabulados, es decir nunca se ha determinado su valor de fricción básica o no se ha publicado (*Jordá-Bordehore Luís & Herrera Raquel, 2018*).

1.6.4. Modelo de falla

El acabado conocimiento del comportamiento de un talud frente a sus posibles roturas repercute enormemente en los costos y en la seguridad, por ello las investigaciones de campo (in situ) y de laboratorio deben ser suficientes, para poder caracterizar en la medida de lo posible las características geomecánicas del terreno, así como los posibles mecanismos de rotura. Se presenta a continuación los diferentes tipos de fallas probables en un talud: cuando esta se encuentra dominada por las estructuras (con control estructural) y cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que determinaría el modelo de falla (sin control estructural) y cuando no es posible determinar

la familia de discontinuidades que determina el modo de falla (sin control estructural) (Morales Mario, 2009)

1.6.4.1. Fallas con control estructural

1.6.4.1.1. Rotura plana

Cuando el deslizamiento corresponde a uno o varios bloques a favor de planos del deslizamiento, las roturas se llaman planas. Este tipo de rotura suele producirse cuando la masa no está confinada lateralmente. Ocurre siempre en taludes naturales o desmontes cuando las discontinuidades tienen la misma dirección del buzamiento que la superficie natural del talud. La tipología de rotura plana es muy frecuente y puede ser de máxima peligrosidad (Melentijevic Svetlana, 2005).

1.6.4.1.2. Rotura por cuña

Cuando el bloque que se desliza está limitado por dos o tres juntas se la conoce como rotura en cuña. Ocurre en taludes cortados por dos superficies de discontinuidades, no paralelas, de tal manera que la línea de intersección de ambos planos aflora en el talud y buza en sentido desfavorable. Este tipo de rotura está delimitada por cuatro caras, dos de planos de discontinuidades, dos de superficie de roca y a veces incluye un plano correspondiente a la grieta de tracción. También la superficie de rotura puede estar formada por planos escalonados e incluso con puentes de roca matriz (Melentijevic Svetlana, 2005).

1.6.4.1.3. Rotura por vuelco (toppling)

Se trata de bloques que, en vez de deslizarse por una discontinuidad, se rotan o vuelcan. Por medio de proyecciones estereográficas se muestra como una familia de juntas y discontinuidades predominante con buzamiento en contra del talud, además de tener un rumbo casi paralelo al mismo (Bernal Claudia, 2017).

1.6.4.2. Fallas sin control estructural

1.6.4.2.1. Caída de rocas

Es el tipo de falla más simple, y sucede cuando una roca suelta, o varias, se movilizan producto de una pequeña perturbación que hace cambiar su estado desde reposo a movimientos, rodando por el talud hasta quedar detenida. Su predicción es muy difícil y por lo tanto se recurre comúnmente a métodos de contención de rocas en la caída más que el modelamiento de la falla misma, por lo tanto, modelos de simulación de caída relativas de rocas sueltas son capaces de producir razonablemente exactas predicciones de trayectorias de caída de rocas (Morales Mario, 2009).

1.6.4.2.2. Falla circular

También conocida como deslizamiento o rotura rotacional, es producida por muchos sets de fallas, las cuales tienen distintos rumbos y mateos, y dejan la roca muy fracturada, perdiendo la cohesión. Por la cantidad de fracturas, el macizo rocoso se convierte en una especie de gravilla, la que desliza por la cara del talud (Morales Mario, 2009).

CAPITULO 2

2. METODOLOGÍA

Generar una metodología adecuada de trabajo para la evaluación de las condiciones geotécnicas de taludes en roca optimiza el tiempo de procesamiento de información recopilada en campo, por esta razón para el desarrollo de esta investigación se lo ha dividido en dos fases: la primera fase comprende la recopilación de datos geotécnicos in situ y la segunda fase corresponde al análisis e interpretación en gabinete de datos obtenidos en el talud, describiendo las metodologías empleadas en cada fase.

2.1. Fase de campo

La fase de campo consistió en la selección y descripción de taludes en roca según la metodología propuesta por Barton y Bar (2015). Como primer paso se hizo el mapeo geotécnico donde se tomó datos in situ de cada talud para la caracterización geomecánica del macizo rocoso, que consistió en describir los siguientes parámetros como: potencia, cambios de dirección, buzamiento, RQD, número de familias de juntas, rugosidad de las juntas, alteración de las juntas, condiciones ambientales y geológicas, condición física, tensión y resistencia, discontinuidad mayor (más relevante).

El levantamiento de información en campo constituye la fase fundamental para el análisis empírico del macizo rocoso, por lo que para el desarrollo de esta fase se realizó la recopilación de datos como se detalla a continuación:

2.1.1. Caracterización geomecánica

La caracterización geomecánica del macizo rocoso es elemental para la ejecución de obras ingenieriles en vías y zonas urbanas ya que su objetivo es comprender las propiedades y características de los materiales del macizo rocoso. Los estudios in situ nos permite obtener datos necesarios para evaluar las condiciones geotécnicas del macizo rocoso. La descripción geotécnica de los macizos rocosos (talud) empieza con el llenado

de una ficha de campo donde se anota los parámetros como la inclinación del talud, dirección del buzamiento y ubicación geográfica usando equipos de precisión como es el caso de una brújula y un GPS respectivamente, los datos recopilados en campo se detallan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Datos de dirección y buzamiento (Yáñez, 2021)

Talud	coordenadas			Buzamiento (°)	Dirección de buzamiento (°)
	X	Y	Z		
1	718608	9831451	3079	75	180
2	705496	9833316	1796	85	81
3	704961	9835001	1290	80	308
4	691512	9850314	339	23	110
5	702643	9831476	1601	85	280
6	704309	9832321	1815	80	300

Esta investigación contempla el levantamiento de datos de seis taludes (estaciones geomecánicas) distribuidos a lo largo de la vía Guaranda - Echeandía para su análisis se los ha denominado: talud 01, talud 02, talud 03, talud 04, talud 05 y talud 06, sus coordenadas geográficas se presentan en la tabla 2.1.



Figura 2.1. Medición mediante brújula de la orientación de un talud (Yáñez, 2021).

2.1.2. Discontinuidades

Las superficies o planos de discontinuidad de los macizos rocosos condicionan de forma definitiva sus propiedades y comportamiento resistente, deformacional e hidráulico. Las discontinuidades imprimen un carácter discontinuo y anisótropo a los macizos, haciéndolos más deformables y débiles, lo que supone una gran dificultad para evaluar el comportamiento mecánico de los mismos frente a las obras de ingeniería. Las discontinuidades representan planos preferentes de alteración, meteorización, fractura, y permiten el flujo de agua (González Luís et al., 2002).

Su reconocimiento, descripción y caracterización es fundamental para el estudio del comportamiento mecánico e hidrogeológico del macizo rocoso. La estabilidad de las excavaciones y de las cimentaciones en roca, por ejemplo, depende de la orientación y la resistencia de la discontinuidad (González Luís et al., 2002).



Figura 2.2. Familias de diaclasas en la vía Guaranda - Echeandía (Yáñez, 2021).

2.1.3. Descripción de las discontinuidades

Una discontinuidad puede ser definida como cualquier corte (fisura, grieta, fractura en un macizo rocoso con resistencia a la tracción nula o muy baja). Las discontinuidades están presentes en la roca y afectan la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la masa. Las diaclasas pueden ser abiertas o cerradas y pueden estar cementadas o no.

Las discontinuidades pueden ser paralelas a los planos de estratificación (rocas sedimentarias) o de clivaje (rocas metamórficas). Por regla general un macizo tiene tres familias de fracturas o diaclasas asociadas a esfuerzos y cuando hay más de tres es porque hay superposición de esfuerzos (Huchamaco Reynaldo, 2018).



Figura 2.3. Determinación del número de discontinuidades por metro (Yáñez, 2021).

La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto primordial en la determinación de resistencia de los macizos rocosos, y para su estimación es necesario precisar las características y propiedades de los planos de discontinuidad. Durante la fase de campo se realizó la recopilación de datos de los siguientes parámetros para cada familia de discontinuidades.

2.1.3.1. Índice de diaclasado (J_n)

El número de familias de discontinuidades condicionan de forma importante el aspecto del macizo rocoso y su comportamiento mecánico. La orientación de las diferentes familias con respecto a una obra o instalación sobre el terreno determina la estabilidad y la inestabilidad de esta (Karzulovic Antonio, 2002).



Figura 2.4. Identificación de familias de juntas (Yánez, 2021).

Para el reconocimiento en campo del macizo rocoso es fundamental registrar todas las familias existentes y valorar su grado de importancia, este grado se puede expresar mediante un sistema simple de identificación, asignando números correlativos para las familias de mayor o menor importancia. De esta forma, la familia principal (mayor continuidad, menor espaciado, mayor abertura, etc.) correspondería a la familia número uno y así sucesivamente (Karzulovic Antonio, 2002).

2.1.3.2. Índice de rugosidad (J_r)

La rugosidad de la superficie de una discontinuidad es un parámetro importante ya que determina en parte la resistencia al corte de la misma, a mayor rugosidad mayor es la resistencia de los planos de discontinuidad, la medida de este parámetro se determina para estimar la resistencia al corte de las discontinuidades, la influencia de la rugosidad decrece con el aumento de la abertura, con el espesor de relleno y con el desplazamiento experimentado entre las paredes (Karzulovic Antonio, 2002).



Figura 2.5. Caracterización del índice de rugosidad línea de color rojo (Yáñez, 2021).

La palabra rugosidad es utilizada para describir la ondulación de las superficies de discontinuidad como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala (milimétrica o centimétrica) presentes en los planos .

El valor de JRC se estimó visualmente usando la escala de perfiles normalizados como se muestra en la figura 2.5, a través de la comparación de un perfil de la discontinuidad con una serie de perfiles de referencia establecidos previamente por Baratón y Choubey (1977) a partir de ensayos reales de corte directo. Cabe mencionar que esta técnica de calcular el JRC adolece de una gran incertidumbre y subjetividad, tendiendo a subvalorar el resultado de JRC. Por lo que se recomienda hacerlo con mucha cautela, siendo más recomendable hacerlo usando un perfilómetro (Jordá Luís et al., 2015).

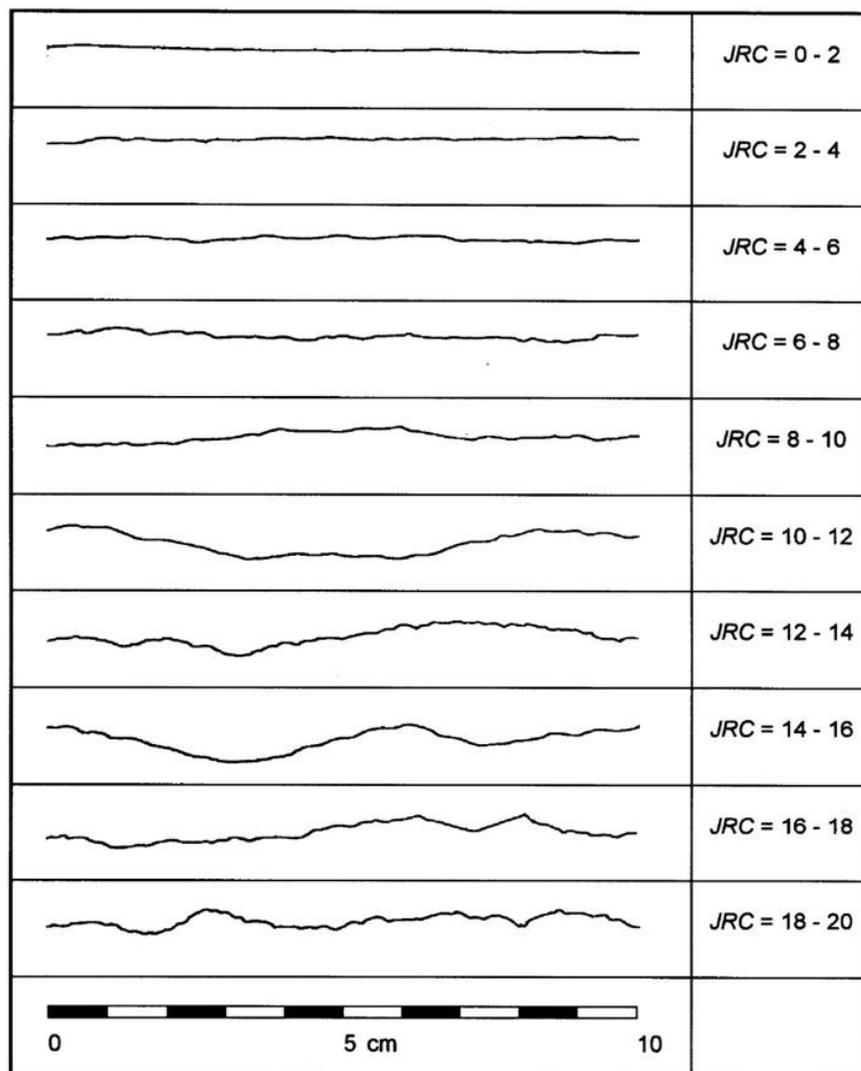


Figura 2.6. Perfiles normalizados para la obtención del JRC. Nótese que la escala es 10 cm (Barton y Choubey, 1997).

2.1.3.3. Índice de alteración (J_a)

El índice de alteración se calcula en función de la rugosidad de las estructuras más débiles, si estas están favorablemente orientadas, entonces deberá escogerse el set más débil de todas las estructuras desfavorablemente orientadas para evaluar J_a . El valor de J_a se calcula como se indica en la tabla 2.2. Debe tenerse presente que los valores de ϕ_{jres} que se indican corresponden a una estimación muy aproximada del ángulo de fricción residual que tendrán las estructuras (Jordá Luís et al., 2015).

Tabla 2.2. Valores del índice de alteración (J_a) (Karzulovic Antonio, 2002).

Condición		ϕ_{jres}	J_a
a) Hay contacto entre las cajas de la estructura			
A	Estructuras bien trabadas y selladas con rellenos duros, impermeables, y que no se ablandan (e.g. cuarzo, epidota, etc.).	---	0.75
B	Estructuras con cajas no alteradas, que solo presentan patinas locales	25 ° a 35 °	1
C	Estructuras con cajas ligeramente alteradas. Pátinas de materiales que no se ablandan y libres de finos: arenas, roca molida, etc.	25° a 30°	2
D	Estructuras con pátinas limo arenosas, con poco contenido de arcilla, que no se ablandan.	20° a 25°	3
E	Estructuras con patinas de minerales arcillosos de baja fricción y que ablandan (e.g. caolinita, micas, etc.)	8° a 16°	4
	Estructuras con pátinas de clorita, talco, yeso grafito, etc. Estructuras con pequeñas cantidades de arcillas expansivas (pátinas discontinuas, de 1 a 2 mm de potencia).		
b) Desplazamiento de corte menores que 10 cm producen contacto entre las cajas de la estructura			
F	Estructuras con rellenos de arenas y/o roca molida, libres de arcilla	25° a 30°	4
G	Estructuras con rellenos de arcilla muy preconsolidadas, que no ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	16° a 24°	6
H	Estructuras con rellenos de arcillas algo a poco preconsolidadas, que se ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	12° a 16°	8
J	Estructuras con rellenos de arcillas expansivas (e.g. montmorillonita, rellenos continuos, con espesores < 5 mm). El valor de J_a depende del contenido de arcilla, de la exposición al agua, etc.	6° a 12°	8 a 12
c) Los desplazamientos de corte no producen contacto entre las cajas de estructura			
K, L, M	Estructuras con rellenos de desintegrado a triturado o arcilla (ver G, H, J para descripciones de material arcilloso).	6° a 24°	6, 8 o 8 - 12
N	Estructuras con rellenos potentes de arenas limosas o limos arcillosos, con poco contenido de arcillas (que no se ablanda).	---	5
O, P, R	Estructuras con rellenos potentes de salbanda arcillosa (ver G, H, J para descripciones del material arcilloso).	6° a 24°	10, 13 o 13 - 20

2.1.3.4. Factor de reducción por agua (J_w)

Por la constante exposición de los taludes y pendientes analizados a factores climáticos como la precipitación y la temperatura por periodos largos es necesario generar un nuevo parámetro que sea similar a su origen al J_w propuesto por Barton *et al.* (1974). De esta manera es como se introduce este valor que, además de analizar si la roca está sana o no, toma en cuenta si la estructura es estable, todo lo anterior en función del tipo de clima al que se encuentra expuesto. La clasificación designada se detalla en la tabla 2.2 (Bar Neil & Barton Nick, 2017).

Tabla 2.3. Número de la condición geológica y ambiental. Modificado por Barton y Bar 2017 (Vergara Emilio, 2020).

J_{wice}^a	Ambiente desértico	Ambiente húmedo	Ambiente tropical	Ambiente polar
Estructura estable; Roca competente	1.0	0.7	0.5	0.9
Estructura estable; Roca incompetente	0.7	0.6	0.3	0.5
Estructura inestable; Roca competente	0.8	0.5	0.1	0.3
Estructura inestable; Roca incompetente	0.5	0.3	0.05	0.2
^a Cuando están instaladas las medidas de drenaje, se debe aplicar $J_{wice} * 1.5$; cuando el talud tiene medidas de seguridad instaladas, se debe aplicar $J_{wice} * 1.3$; si están instaladas ambas medidas, se debe aplicar $J_{wice} * 1.5 * 1.3$				

2.1.3.5. Factor de reducción por condiciones de superficie, esfuerzos y orientación de discontinuidades (SRF_{slope})

Este factor está diseñado de manera específica para taludes, por lo que se considera tres tipos de SRF_{slope} : SRF_a , SRF_b , SRF_c . El valor de SRF_{slope} corresponde al valor más adverso de los tres, es decir el mayor.

- SRF_a tabla 2.3. describe la condición física de la superficie del talud (al instante o a futuro) debido a la susceptibilidad a la intemperie y a la erosión.
- SRF_b tabla 2.4. por su parte describe los rangos adversos de resistencia al stress en el talud.

- SRF_c tabla 2.5. se califica gracias a las discontinuidades mayores como falas, zonas de debilidad y enjambres de diaclasa que contengan relleno de arcillas que afecte la estabilidad del talud (Vergara Emilio, 2020).

Tabla 2.4. SRFa Condición física. Modificado de Barton y Bar 2017 (Vergara Emilio, 2020).

Descripción		SRF_a
A	Leve afloramiento debido a la ubicación de la superficie, perturbaciones por tronaduras o excavaciones	2.5
B	Bloques sueltos, signos de grietas de tensión y cizalle, susceptibilidad a la intemperie, alteración severa producto de tronaduras	5
C	Como B, pero mayor susceptibilidad a la intemperie	10
D	El talud se encuentra en una etapa avanzada de erosión y aflojamiento debido a la erosión periódica por el agua y/o efectos de la cuña de hielo	15
E	Talud residual con significativo transporte de material cuesta abajo	20

Tabla 2.5. Clasificación de estrés y fuerza del talud. Modificado de Barton y Bar (2017) (Vergara Emilio, 2020).

Descripción		SRF_b
F	Rango de estrés y fuerza moderado	2.5 - 1
G	Rango de estrés y fuerza alto	5 - 2.5
H	Fallamiento localizado de roca intacta	10 - 5
J	Rotura o comportamiento plástico	15 - 10
K	Flujo plástico de material suavizado por deformación	20 - 15

Tabla 2.6. Condición de la mayor discontinuidad. Modificado de Barton y Bar (2017) (Vergara Emilio, 2020)

SRF_c	Favorable	Desfavorable	Muy desfavorable	Causa fractura si esta sin soporte	
L	Mayor discontinuidad con poca o sin arcilla	1	2	4	8
M	Mayor discontinuidad con $RQD_{100} = 0^a$ debido a arcilla y salvanda	2	4	8	16

N	Mayor discontinuidad con $RQD_{300} = 0^b$ debido a arcilla y salvanda	4	8	12	24
$a_{RQD_{100}}$ = Muestra perpendicular de 1 m de discontinuidad $b_{RQD_{300}}$ = Muestra perpendicular de 3 m de discontinuidad					

2.1.3.6. Ensayo para determinar la fricción básica de la discontinuidad

El ensayo “Tilt-Test” o prueba de inclinación es una metodología que se usa para determinar el ángulo de fricción básico. Sin embargo, esta no es definitiva a causa de que la definición de dicho ángulo no está determinada. El ángulo de fricción básico es un parámetro importante para determinar la resistencia al corte en juntas de discontinuidades que no contengan relleno y que no presenten meteorización.

Este ensayo permite el deslizamiento de un bloque sobre otro bloque con la superficie aserrada. El punto en el que se produce un deslizamiento de más de 10 % de longitud medido de forma gradual se llama ángulo de fricción básico, el cual es un parámetro que se puede obtener en campo o en laboratorio y sirve como base para calcular la resistencia al corte de discontinuidades (Gaona Cesar & Rodríguez Edwin, 2019).

Existen diferentes métodos para ejecutar el ensayo, esto va a depender de la geometría de las muestras o especímenes a analizar, este ensayo es rápido, sencillo y económico. Se puede ejecutar con un par de muestras con superficie plana, con tres núcleos, entre otros. Para los de geometría rectangular planar se tienen las expresiones de altura (h); longitud (l); ancho (w), donde relación l/h debe ser mayor a 4 y a su vez los núcleos deben contener un diámetro mayor o igual a 50 mm donde la relación longitud/diámetro debe ser mayor o igual a 2 (Gaona Cesar & Rodríguez Edwin, 2019).

Por otra parte, Barton propuso que el ángulo de fricción básico de un material rocoso se puede obtener a través del ensayo de tilt test sobre muestras de roca sana, planos, secos y aserrados en laboratorio, el ángulo a determinar de una placa sobre la otra es el que se le da al momento del deslizamiento de la placa o cuerpo de prueba superior. Para Stimpson, las muestras para el ensayo resulta más sencillo cortarlos de manera cilíndrica en contradicción con lo que indicaba Barton (con una geometría rectangular o en placas),

por tanto, se propuso con tres cilindros o testigos permitiendo que cada uno de ellos se deslizará paralelamente a la posición de los otros cilindros en la parte inferior y así medir el ángulo de inclinación en el momento del deslizamiento.



Figura 2.7. Prueba de inclinación (Yáñez, 2021).

Simplificando la prueba de inclinación (tilt test) es el método más simple para determinar el ángulo de fricción básico. Donde a menudo se emplean aparatos de prueba simple que son operados manualmente y que se puede realizar en campo o en laboratorio. Para Cruden y Hu el ángulo de fricción interno o básico de las discontinuidades del macizo rocoso es esencial para evaluar estabilidad de taludes en roca.

$$\varphi_b = \varphi_r + 20 - 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

φ_b = Ángulo de fricción básico de la roca

φ_r = Ángulo de fricción residual

r = Rebote del martillo Schmidt en superficies húmedas y meteorizadas, tal y como se suelen encontrar normalmente en campo

R = Rebote del martillo de Schmidt en superficies lisas no alteradas de la misma roca

2.1.3.7. Toma de datos para el ensayo Tilt-Test

Primero se identifica una junta susceptible donde se pueda realizar el ensayo, extraemos la muestra cuidadosamente del macizo rocoso evitando la alteración del bloque, de esta manera se garantiza que el labio superior como el inferior de las juntas rugosas se acoplen bien. Se debe considerar que juntas muy lisas no funciona o no es recomendable hacer el ejercicio.

En el sitio donde se tomó la muestra para ensayar se realiza 20 pruebas de rebote con un martillo Smith o esclerómetro tipo N. Cabe mencionar que los 20 datos deben ser tomados en el mismo sentido (vertical u horizontal). Medimos la rugosidad en la misma dirección que lo hacemos deslizar, para esto comparamos los labios de la junta con el grafico de perfiles normalizados para la obtención del JRC de Barton y Choubey (1997). ya que no se disponía de un perfilómetro (peine de Barton).



Figura 2.8. Izquierda elección del bloque a ensayar; derecha prueba de rebote esclerómetro (Yáñez, 2021).

Otro de los parámetros que se obtiene en campo es el peso del bloque superior para esto se usó una balanza electrónica la misma que determinó el peso en gramos, una vez reportado el valor del peso que tiene el bloque superior, se procede a calcular el área de contacto en cm, la multiplicación del largo por el ancho medido en la zona de contacto entre el labio superior con el inferior de la junta se tiene el área de contacto en cm^2 .



Figura 2.9. Izquierda peso del bloque superior; derecha área de contacto (Yáñez, 2021).

Para medir el ángulo de inclinación (α), colocamos un bloque sobre el otro de manera tal que la junta sea el contacto en el plano horizontal, a medida que vamos inclinado poco a poco el bloque inferior pero sin interactuar con el bloque superior que está en contacto por su propio peso sin que influyan fuerzas externas observamos que inicia el deslizamiento del bloque superior en este momento se debe detener el ensayo, y con ayuda de un inclinómetro tomamos el ángulo que presenta el bloque inferior, el grado de inclinación observado en este punto es el ángulo buscado para el ensayo tilt test.



Figura 2.10. Izquierda deslizamiento del bloque superior; derecha lectura del ángulo de inclinación (Yáñez, 2021).

2.2. Fase de gabinete

Una vez finalizada la fase de campo se procede a realizar el procesamiento de los datos en gabinete, se empezó con el análisis cinemático de la información recopilada in situ de cada uno de los taludes como es: inclinación, dirección de buzamiento, familias de discontinuidades, ángulo de fricción básico, posteriormente se evalúa el RQD para determinar la calidad del macizo rocoso y poder establecer un criterio de estabilidad del talud en condiciones naturales, a continuación se realizan los cálculos de Q Slope y finalmente precedemos con la determinación del ángulo de fricción básico.

2.2.1. Análisis cinemático

La característica más importante de una discontinuidad es la orientación, la cual se define en base a dos parámetros medidos en la línea de máxima pendiente del plano: buzamiento y dirección de buzamiento (Garzón Julio & Torrijo Javier, 2018).

La proyección estereográfica es una herramienta fundamental en la ingeniería geológica. Su principal función es representar la orientación (dirección) e inclinaciones (buzamiento o inmersión) preferentes de elementos que en la naturaleza no se pueden presentar con desarrollos geométricos perfectos. Una de las ventajas de esta técnica es que permite medir los ángulos de forma directa. Entre las aplicaciones más importantes para este estudio es el reconocimiento de juegos de diaclasa en un afloramiento rocoso (Flores Christián & Pineda Andrés, 2015).

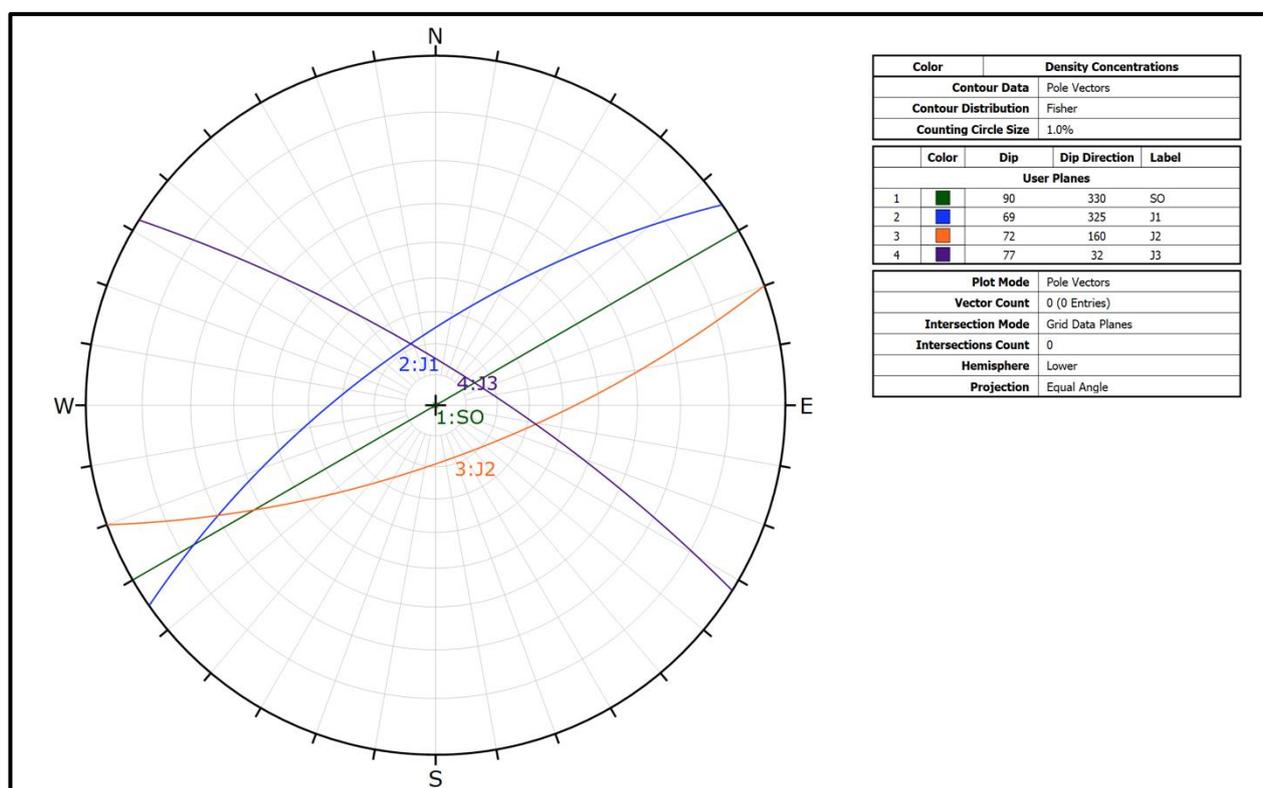


Figura 2.11. Representación estereográfica obtenida con el software Dips en el Talud uno (Yáñez, 2021).

Para la generación de los estereogramas se usó el software Dips en la versión 6.008, este es un programa para el análisis interactivo de datos geológicos, tiene una interfaz que permite al usuario la configuración de la información que ingresamos en la hoja principal denominada cuadrícula. Este programa dispone de una serie de herramientas de análisis cinemáticos de acuerdo a los requerimientos del analista, en este caso se usó para proyectar los estereogramas y determinar el tipo de falla que presenta un talud.

2.2.1.2. Determinación del ángulo de fricción residual

Una vez recopilada la información referente a: resistencia a la compresión de los labios de la discontinuidad, peso del bloque superior, área de contacto de los dos bloques, coeficiente de rugosidad y ángulo de inclinación, procedemos a obtener el ángulo de fricción residual usando la siguiente ecuación.

$$\varphi r = \alpha - JRC_0 \left(\log_{10} \frac{JCS_0}{\sigma n_0} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

- α Ángulo de inclinación
- JRC_0 Coeficiente de rugosidad
- σn_0 Tensión normal sobre la discontinuidad

2.2.1.3. Determinación del ángulo de fricción básico

El ángulo de fricción básico se determinó a partir del ensayo de campo Tilt-Test y el resto de los parámetros que se obtuvieron in situ en los macizos rocosos, usando la fórmula simplificada de la fricción básica y residual de la siguiente manera:

$$\varphi b = \varphi r + 20 - 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (2.4)$$

2.2.2. Determinación del RQD

El grado de fracturación del macizo rocoso fue determinado en base al número de fisuras contenidas en la unidad de volumen, usando la expresión de Priest y Hudson (1981), que emplea el índice de fracturas por metro lineal (λ).

$$\lambda = \frac{\text{Número de discontinuidades}}{\text{Longitud}}$$

$$RQD_{\lambda} = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (2.5)$$

Donde:

λ Número de discontinuidades por metro lineal

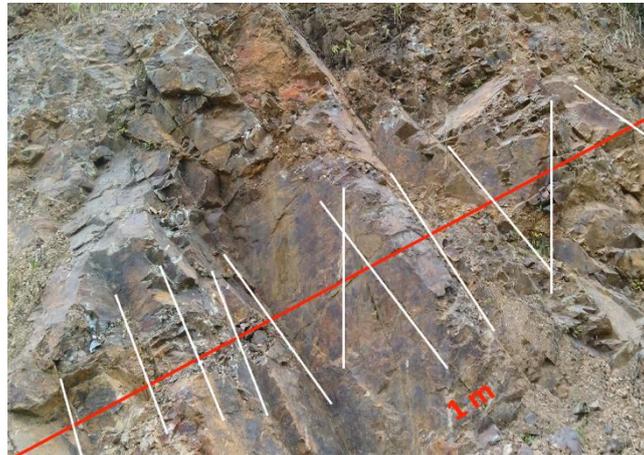


Figura 2.12. Número de discontinuidades intersectadas por metro lineal. (Yáñez, 2021).

2.2.3. Determinación del Q Slope

El método empírico Q Slope es muy utilizado para expresar cualitativamente el efecto de la pendiente en la estabilidad de taludes, para su análisis se requiere los resultados obtenidos de la valoración de la calidad de la roca (RDQ), índice de diaclasado o número de juntas (J_n), los que determinan el tamaño de los bloques presentes en el macizo rocoso; rugosidad de las juntas (J_r) y la alteración de las juntas (J_a), los cuales determina la rugosidad y resistencia al corte de las diaclasas; factores ambientales externos (J_w), los esfuerzos y resistencia (SRF).

El método Q Slope es muy parecido al propuesto por Barton et. al. (1974). La ventaja de este método es que permite evaluar la estabilidad de las pendientes en campo dando la opción de realizar un ajuste de los ángulos durante la construcción (Bar Neil & Barton Nick, 2017).

CAPITULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resultados

Con los datos geotécnicos obtenidos en los taludes se realizó el análisis para la clasificación geomecánica con la finalidad de evaluar cualitativa y cuantitativamente los afloramientos rocosos según el método empírico Q Slope propuesto por Barton & Bar 2017.

3.1.1. Cálculo del ensayo Tilt test

De acuerdo con el ensayo tilt test y la ecuación 2.2. se determinó el ángulo de fricción residual de los macizos rocosos. En este trabajo de investigación se obtuvo un rango de valores desde 10.68 a 37.60 grados como se aprecia en la tabla 3.1. Estos resultados fueron utilizados únicamente para el análisis cinemático en el software Dips, permitiendo de esta manera definir el tipo de falla que produce la inestabilidad del talud.

Tabla 3.1. Resultados del ensayo tilt test (Yáñez, 2021).

Parámetro	Talud					
	1	2	3	4	5	6
Valor promedio esclerómetro $\bar{R}_5 \rightarrow \sigma_c$	37.6	44.8	45.8	45.6	39.6	30.4
Valor promedio esclerómetro $\bar{r}_5 \rightarrow JCS_0$	24.8	30.4	25.2	33.6	24	20.8
JCS_0 (MPa)	20	24	21	34	14	15
Peso del bloque superior W (gramos)	1317	4076	4860	1382	2309	380
Área de contacto de los bloques en cm^2	100	208	253	150	168	80
Coefficiente de rugosidad JRC_0	4 - 6	6 - 8	8 - 10	6 - 8	2 - 4	4 - 6
Angulo de inclinación tilt α	25	47	40	50	40	55
Peso del bloque superior en MN $(g)x10^{-8}$	1317.10^{-8}	4076.10^{-8}	4860.10^{-8}	1382.10^{-8}	2309.10^{-8}	380.10^{-8}
Área de contacto en m^2 $(cm^2)x10^{-4}$	100.10^{-4}	208.10^{-4}	253.10^{-4}	150.10^{-4}	168.10^{-4}	80.10^{-4}
$\sigma_{n_0} = \frac{Wx \cos \alpha}{A}$	$1.1936,10^{-3}$	$1.3364,10^{-3}$	$1.4715,10^{-3}$	$5.9222,10^{-4}$	$1.0528.10^{-3}$	$2.7244.10^{-4}$
$\varphi r = \alpha - JRC_0 \left(\log_{10} \frac{JRC_0}{\sigma_{n_0}} \right)$	3.87	17.22	2.60	16.68	27.62	31.29
$\varphi b = \varphi r + 20 - 20 \left(\frac{r}{R} \right)$	10.68	23.6	11.59	21.94	35.49	37.60
Valor medio φb	23.40					

3.1.2. Estaciones geomecánicas

El análisis geomecánico usado en esta investigación de taludes artificiales en la vía Guaranda - Echeandía se basó en la generación de información empleando métodos empíricos tales como: índice de calidad de la roca (RQD), tilt test, combinados con criterios como Barton & Choubey, Barton & Bar, para elegir, definir y analizar datos requeridos en la determinación de la probabilidad de falla (criterios de ruptura Dips V6.0), que define de forma numérica la inestabilidad de un macizo rocoso.

Adicional se hizo énfasis en el análisis por familias de discontinuidades que presentan los taludes utilizando estaciones geomecánicas con respecto a proyecciones estereográficas, apoyándome de la falsilla de Schmidt, de tal manera que la información resultante sea robusta y confiable, obteniendo consistencias importantes en la interpretación y análisis de los resultados de cada una de las estaciones geomecánicas a investigar y que condiciones o variables están influyendo en la inestabilidad de ese macizo rocoso.

3.1.2.1. Estación 01 (Talud 1)

El talud 1 está localizado en la comunidad Quila, geográficamente se encuentra en las coordenadas: X: 718608; Y: 9831451. el macizo rocoso tiene poca vegetación arbustiva, este afloramiento natural tienen una altura de 15 m, por su altitud (3080 m.s.n.m.) el sitio corresponde a una zona climática sub-templada caracterizada por su clima muy frío determinado por la altitud de las montañas. Su temperatura anual varía de 6 a 12 °C, las precipitaciones anuales son de 1000 a 1500 mm que caen levemente, pero de manera prolongada durante todo el año.

El talud 1 está conformado por roca andesítica de la formación Macuchi con moderadas alteraciones, aplicando el análisis cinemático se determinó la presencia de fallas tipo cuña y vuelco. La inestabilidad de la falla tipo cuña está dada por el encuentro de las discontinuidades asociadas a la junta 3 con la junta 2 muy cerca de la zona crítica formando un ángulo oblicuo con, la falla por vuelco tiene una probabilidad de 15 % en función de siete polos de intersección encontrados dentro de la zona crítica formando cuñas de inestabilidad (ver Figura 3.1.)

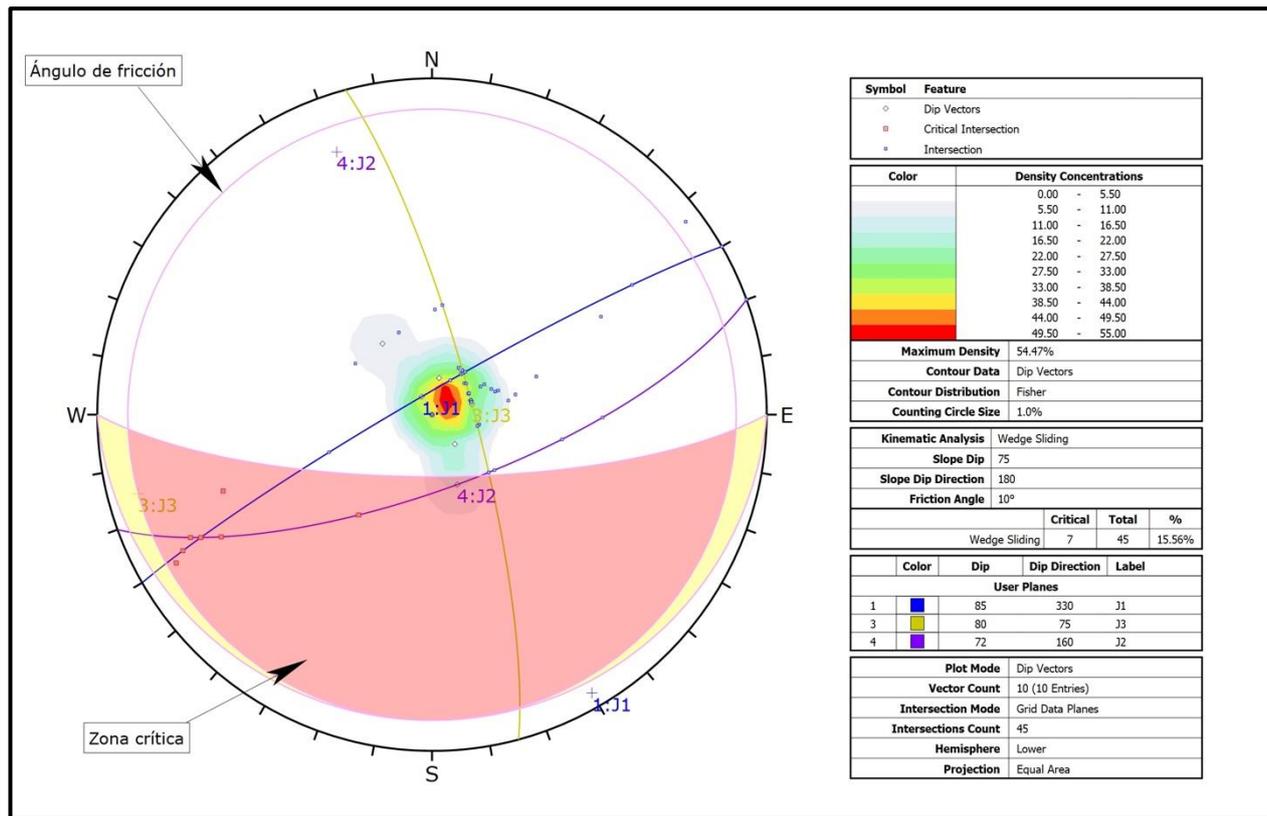


Figura 3.1. Análisis estereográfico del Talud 1, muestra falla tipo cuña (Yáñez, 2021).

En la estación geomecánica 01 también se encontró las condiciones para la ocurrencia de fallas tipo vuelco por las discontinuidades que forman las juntas 2 y 1 que buznan hacia el talud, adicionalmente se observó 2 puntos dentro de la zona crítica, y su probabilidad es de 20 %. La junta 2 no generó inestabilidad para este tipo de falla (ver Figura 3.2).

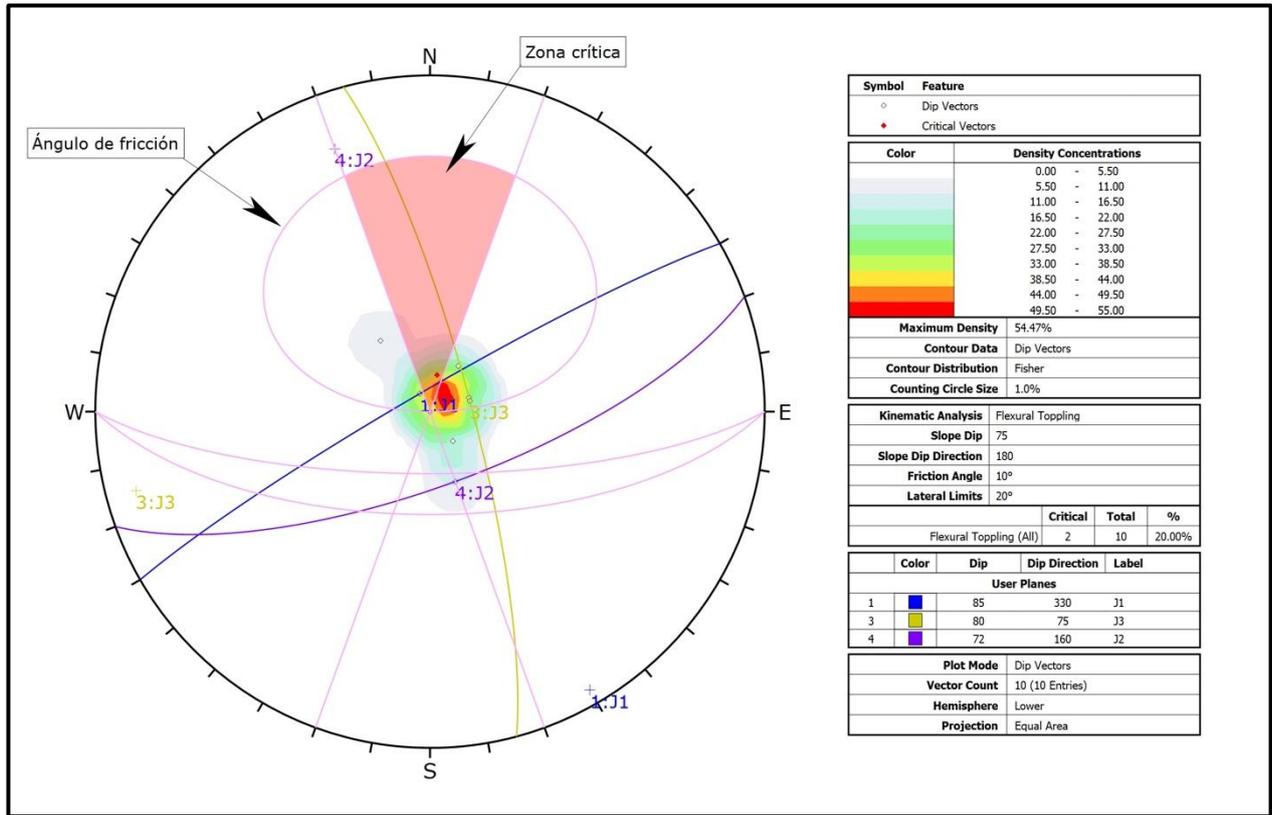


Figura 3.2. Análisis estereográfico del Talud 1, presenta falla tipo vuelco (Yáñez, 2021).



Figura 3.3. Estación geomecánica 01 (Yáñez, 2021).

3.1.2.2. Estación 02 (Talud 2)

El talud 02 se encuentra en la comunidad de Capilluco en las coordenadas: X: 705496; Y: 9833316, la morfología del lugar corresponde a una vertiente heterogénea conformada por rocas andesíticas de la formación Macuchi. La altitud registrada en el macizo rocoso es de 1779 m.s.n.m. lo que lo caracteriza como una zona climática subtropical húmeda, conocida también como zona de transición entre las regiones que limitan la sierra y la costa, las precipitaciones oscilan entre 1500 y 2000 mm anuales y se presenta de manera constante durante todo el año, originando una sola estación climática, la vegetación es casi selvática y su temperatura anual es de 18 a 22 °C, puede variar según su altitud.

El análisis cinemático del talud 2 indica que está compuesto por dos familias de discontinuidades dando como resultado 33.33 % de inestabilidad del talud por fallas tipo cuña, y 15 polos de intersección dentro de la zona crítica (ver Figura 3.4).

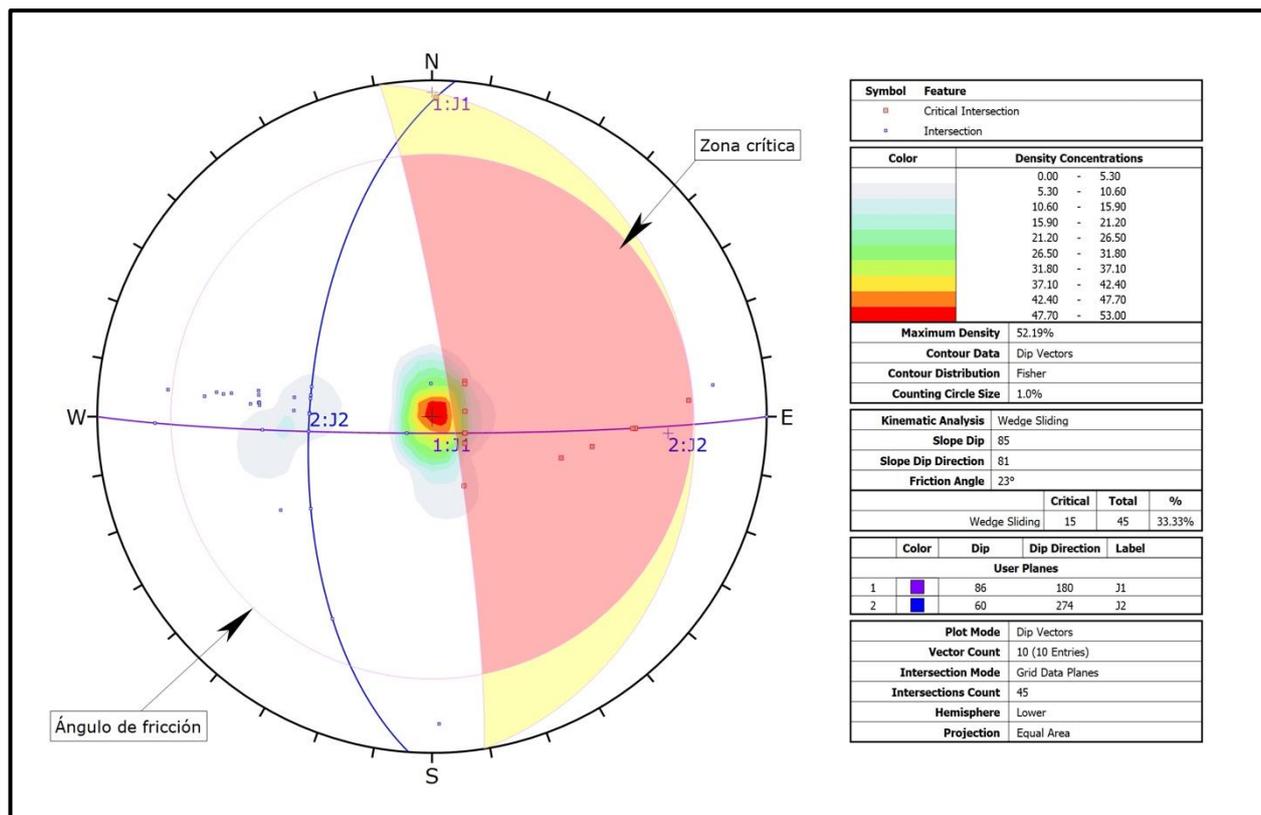


Figura 3.4. Análisis estereográfico del Talud 2, presenta falla tipo cuña (Yáñez, 2021).

Adicional se identificó que el talud 2 está afectado por fallas tipo vuelco directo ya que presenta una probabilidad de ocurrencia de 46.67 %. La inestabilidad del talud está controlada por la intersección de la junta 2 con la junta 1 dentro de la zona crítica y la presencia de 21 polos de intersección dentro dicha zona. Las dos discontinuidades buzan hacia el talud ocasionado la caída de bloques (ver Figura 3.5).

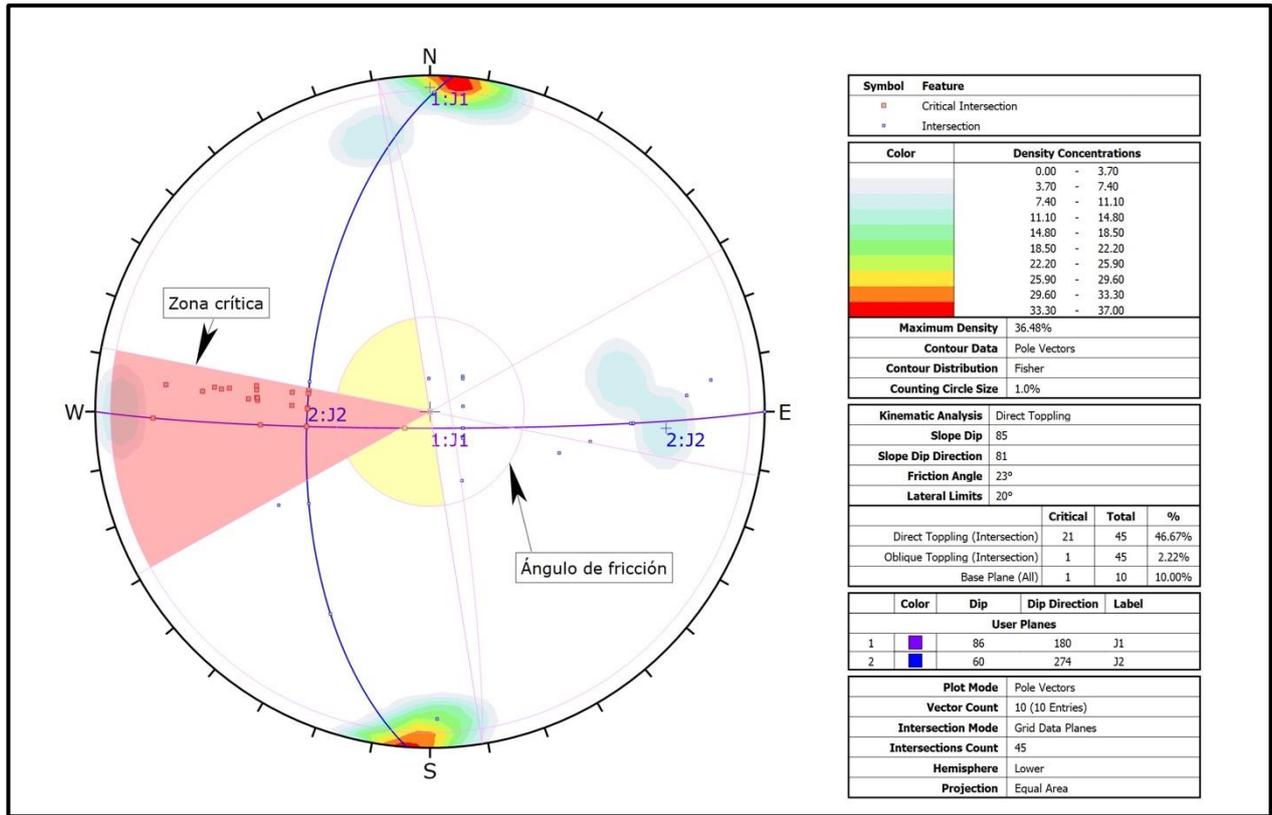


Figura 3.5. Análisis estereográfico del Talud 2, presenta fallas tipo vuelco directo (Yáñez, 2021).



Figura 3.6. Estación geomecánica 02 (Yáñez, 2021).

3.1.2.3. Estación 03 (Talud 3)

El talud 3 está ubicado en el recinto El Limón en las coordenadas: X: 704961; Y: 9835001, La forma del terreno donde se localiza el macizo rocoso analizado se denomina vertiente heterogénea con fuerte disección la misma que está conformada por lavas indiferenciadas de la formación Macuchi. Por sus características climáticas y su altitud (132 m.s.n.m.) al sitio se lo clasificó como una zona sub-tropical húmeda con temperaturas que van desde los 18 hasta los 22 °C, la vegetación predominante es bosque natural, la precipitación media anual oscila entre los 1500 y 2000 mm.

La proyección estereográfica de Schmidt, muestra la cinemática de las estructuras, obteniendo probabilidades de 66.67 para fallas planares por la relación que tienen con la estratificación y por los 6 polos de intersección que se encuentran dentro de la zona crítica, la intersección entre la junta 1 y 2 está fuera de la zona crítica (ver Figura 3.7).

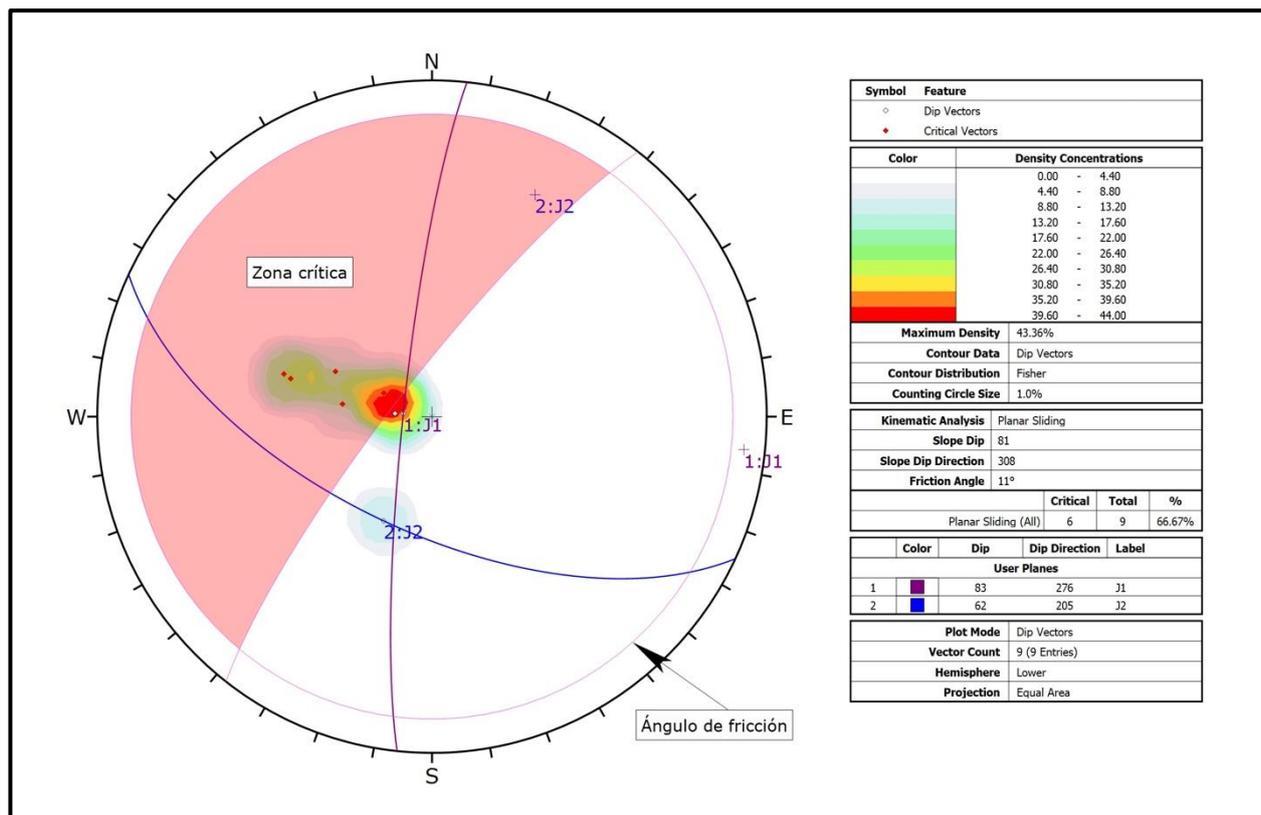


Figura 3.7. Análisis estereográfico del Talud 3, presenta fallas tipo planar (Yáñez, 2021).

Continuando con el análisis estereográfico se determinó la existencia de fallas tipo cuña dentro de la estación geomecánica 03 con una probabilidad de ocurrencia de 52.78 % corroborando la inestabilidad que presenta este macizo rocoso con 21 polos localizados dentro de la zona crítica, logrando definir la caída de rocas en el mismo sentido del talud por el buzamiento hacia el talud de las discontinuidades (ver Figura 3.8).

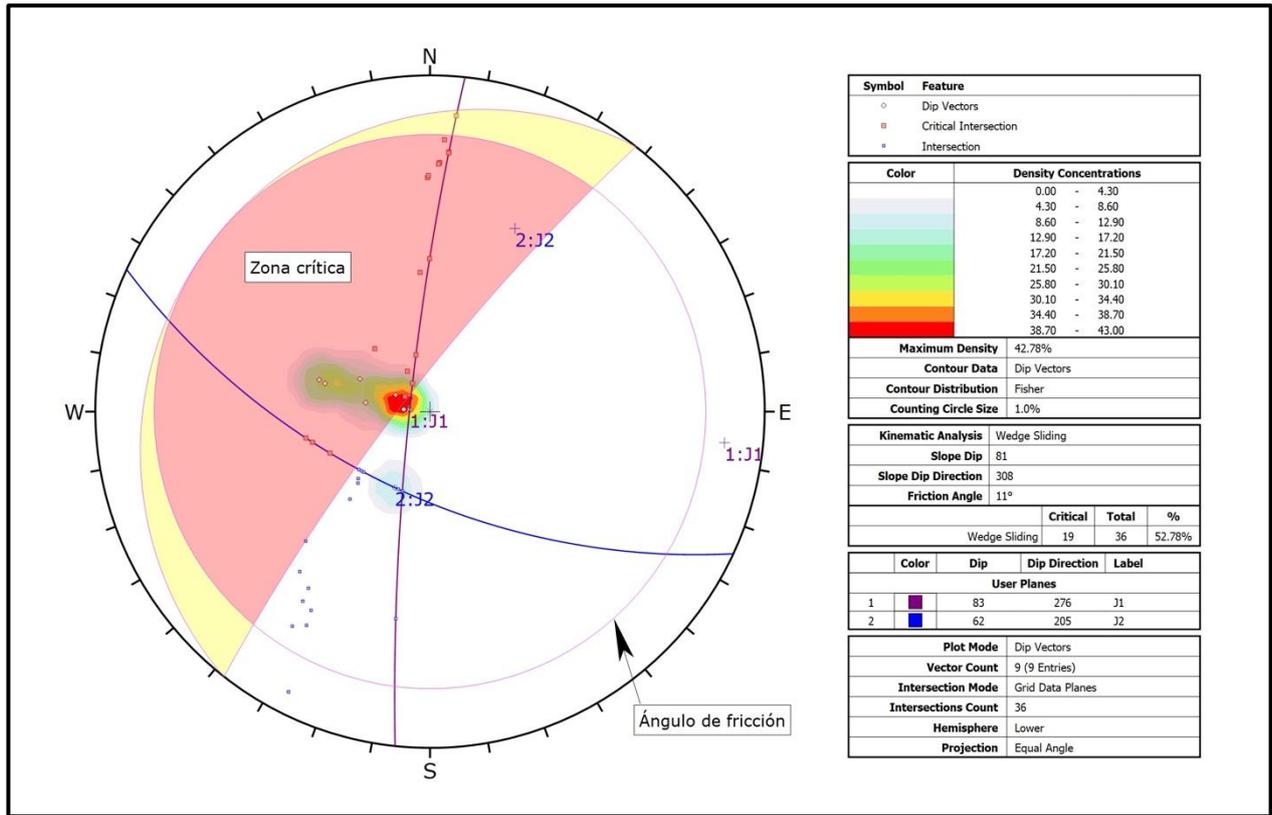


Figura 3.8. Análisis estereográfico del Talud 3, fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).



Figura 3.9. Estación geomecánica 03 (Yáñez, 2021).

3.1.2.4. Estación 04 (Talud 4)

El talud 4 se localiza en el recinto El Congreso en la las coordenadas: X: 691512; Y: 9850314, El macizo rocoso estudiado pertenece a un relieve colinado muy alto de la formación Macuchi compuesto por rocas volcanoclásticas gruesas, con una pendiente dominante de 40 a 70 %, su altitud es de 306 m.s.n.m. valor que lo clasifica como una zona climática tropical semi-húmeda, reporta precipitaciones de 1500 a 2000 mm anuales y su temperatura oscila entre los 23 y 26 °C, la vegetación predominante es la arboricultura tropical como se muestra en la figura 3.12.

La proyección estereográfica de Schmidt, presenta la cinemática de las geoestructuras, obteniendo probabilidad de falla tipo cuña de 6.6 % ya que las líneas de intersección entre la junta uno y la junta dos están fuera de la zona crítica, sin embargo, tenemos tres puntos de intersección dentro de esta zona delimitada con el color rojo (ver Figura 3.10).

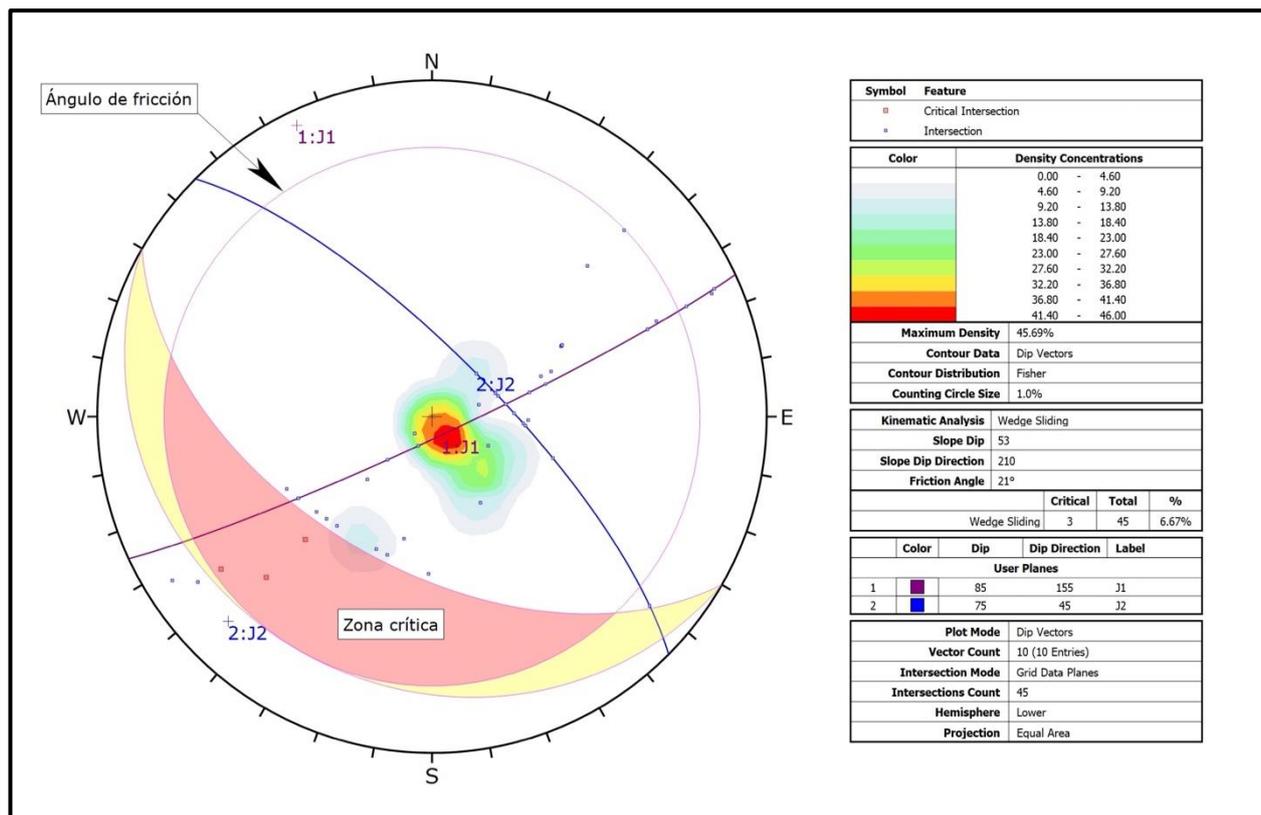


Figura 3.10. Análisis estereográfico del Talud 4, presenta fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).

El análisis cinemático del talud 4 muestra 10 % de probabilidad de ruptura por vuelco formado por el plano de la junta 2 que se ubica subparalelo al talud, pero con sentido de buzamiento contrario, y la ubicación de un polo dentro de la zona crítica, estas condiciones hacen que los bloques de roca fracturada caigan por gravedad y su propio peso, volcándose en el mismo sentido de la cara del talud (ver Figura 3.11).

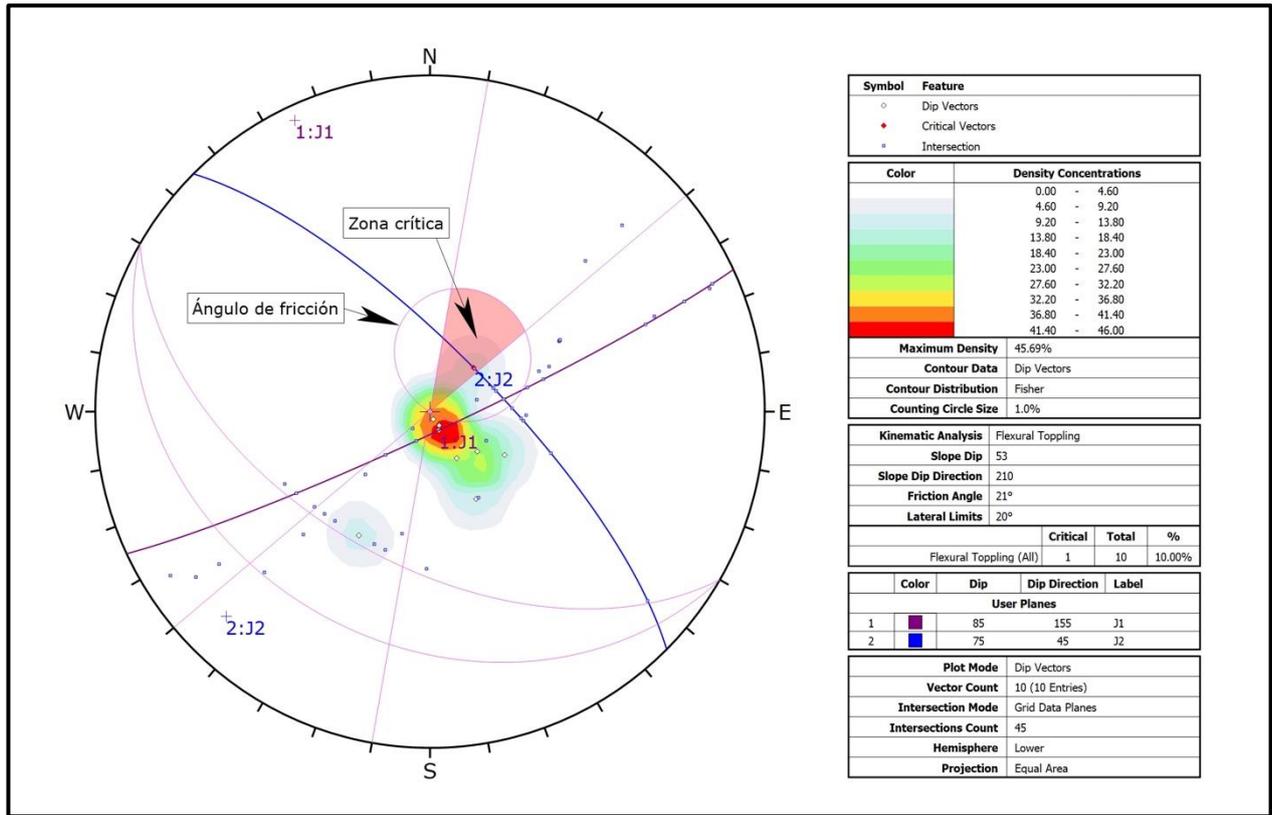


Figura 3.11. Análisis estereográfico del talud 4, presenta fallas tipo vuelco (Yáñez, 2021).



Figura 3.12. Estación geomecánica 04 (Yáñez, 2021).

3.1.2.5. Estación 05 (Talud 5)

El talud 5 se localiza en el recinto Huachana en las coordenadas: X: 702643; Y: 9831476, Este macizo rocoso está dentro de una vertiente heterogénea con fuerte disección, constituida por lavas indiferenciadas de la formación Macuchi, la altura registrada en el sitio es de 1643 m.s.n.m. razón por la cual se lo clasificó como una zona climática subtropical húmeda, en el sector se reportan precipitaciones de 1500 a 2000 mm anuales y su temperatura varía entre 18 y 22 °C, la vegetación existente es pasto cultivado como se observa en la figura 3.14.

Los resultados de la proyección estereográfica muestran una probabilidad de 88.89 % de inestabilidad del talud por fallas tipo cuña, respaldada por la presencia de 40 puntos de intersección dentro de la zona crítica. La intersección entre las líneas de la junta uno con

la junta dos se encuentra dentro de esta área crítica generando inestabilidad geotécnica por este tipo de falla (ver Figura 3.13).

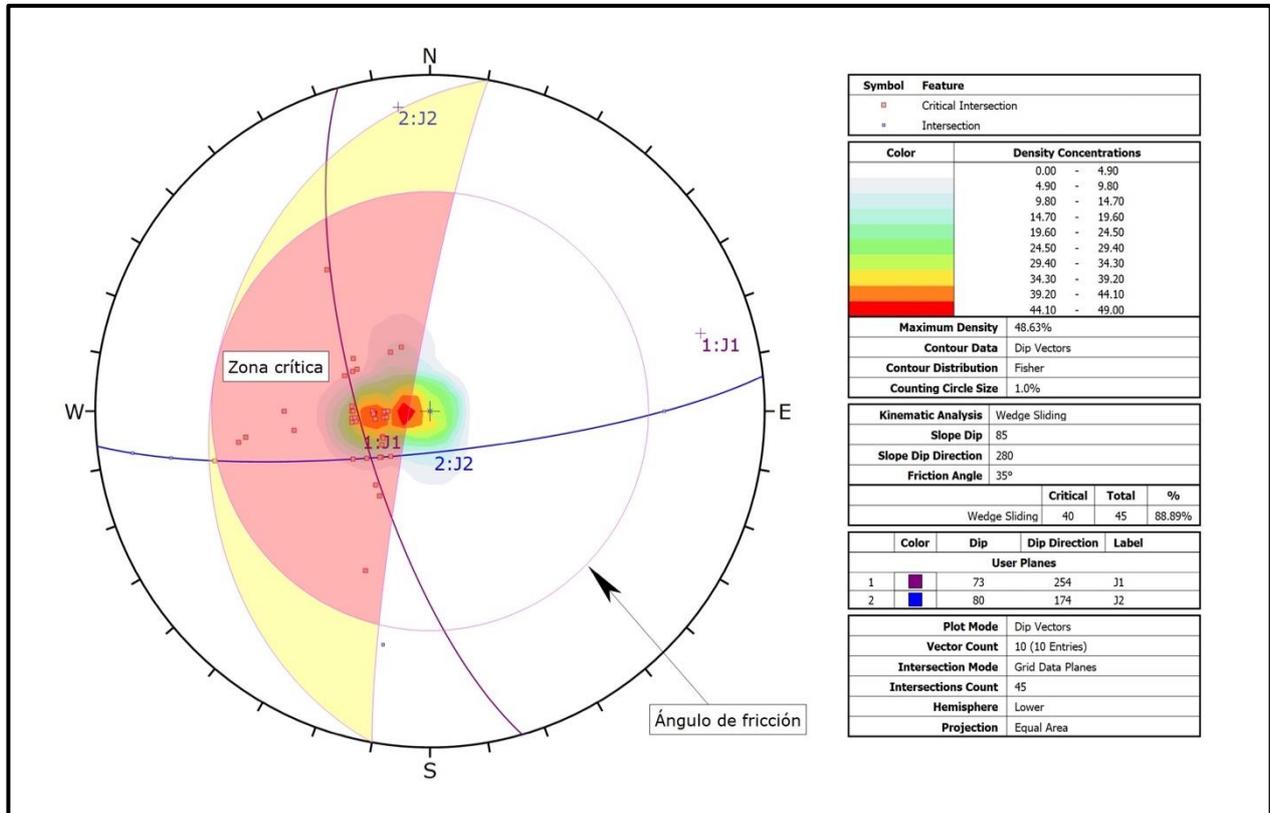


Figura 3.13. Análisis estereográfico del Talud 5, presenta fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).



Figura 3.14. Estación geomecánica 05 (Yáñez, 2021).

3.1.2.6. Estación 06 (Talud 6)

El talud 6 se ubica en el recinto Huachana en las coordenadas: X: 704309; Y: 9832321, El área de estudio se encuentra en una vertiente heterogénea con fuerte disección conformada por lavas indiferenciadas de la formación Macuchi, en el sector se reporta una altitud de 1829 m.s.n.m. caracterizándola como una zona climáticamente sub-tropical húmeda con precipitaciones que van desde los 1500 hasta los 2000 mm anuales y su temperatura oscila entre los 18 y 22 °C, al momento de la descripción se identificó escasa vegetación arbustiva.

Aplicando el análisis cinemático de ruptura en macizos rocosos se llegó a determinar que el talud presenta inestabilidad por fallas planas ya que la línea de la junta 1 es subparalela al talud con 10 % de probabilidad de ocurrencia. Dentro de la zona crítica solo se localizó un polo de intersección (ver Figura 3.15).

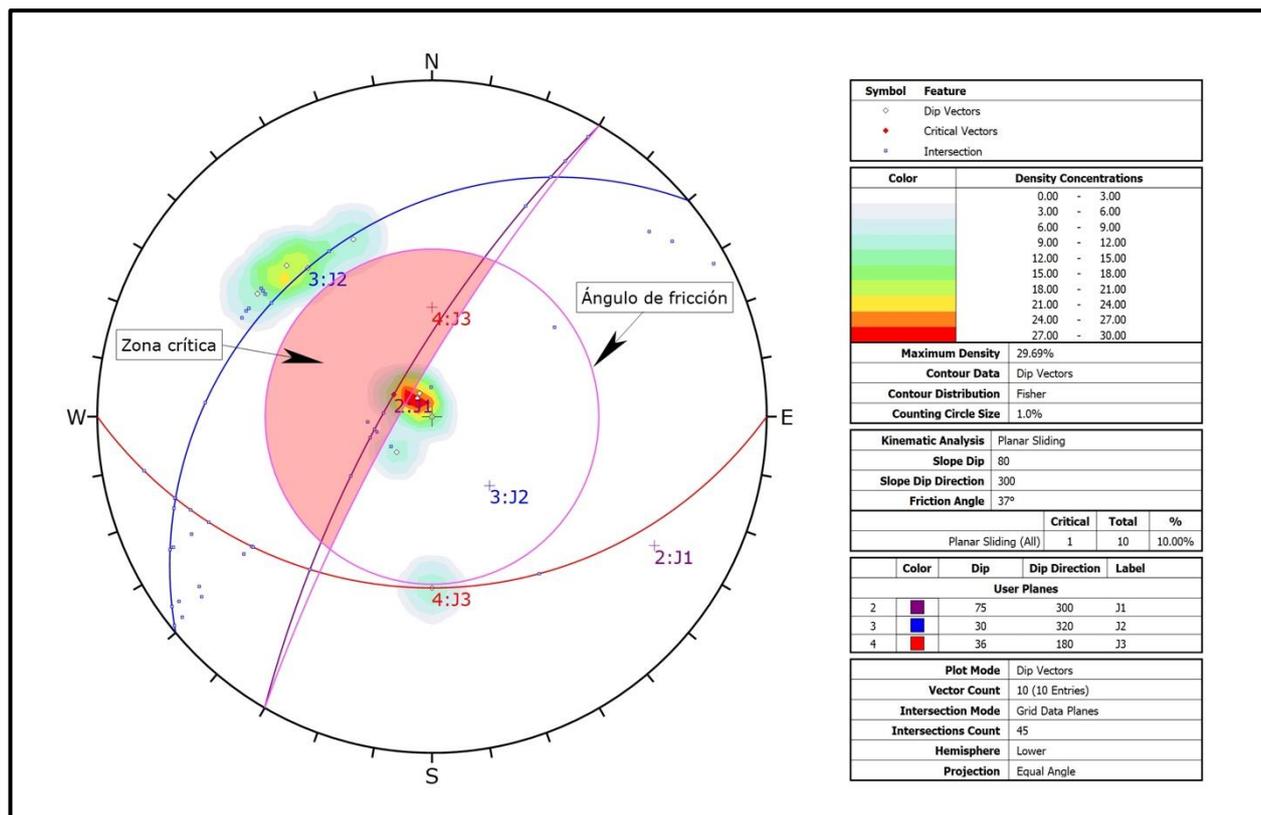


Figura 3.15. Análisis estereográfico del Talud 6, presenta fallas de tipo planar (Yáñez, 2021).

Aplicando el análisis cinemático en el talud 6 los resultados muestran fallas tipo cuña generadas por la intersección entre la junta 2 y la junta 3 que forman un ángulo oblicuo con una línea de intersección subparalela a la dirección del buzamiento del macizo rocoso, tiene una probabilidad de inestabilidad de 24.44 %, dentro de la zona crítica se identificaron 11 polos. La intersección entre las discontinuidades 2 y 3 se ubica fuera de la zona crítica. Se puede decir que es un talud inestable de acuerdo con las condiciones ya mencionadas (ver Figura 3.16).

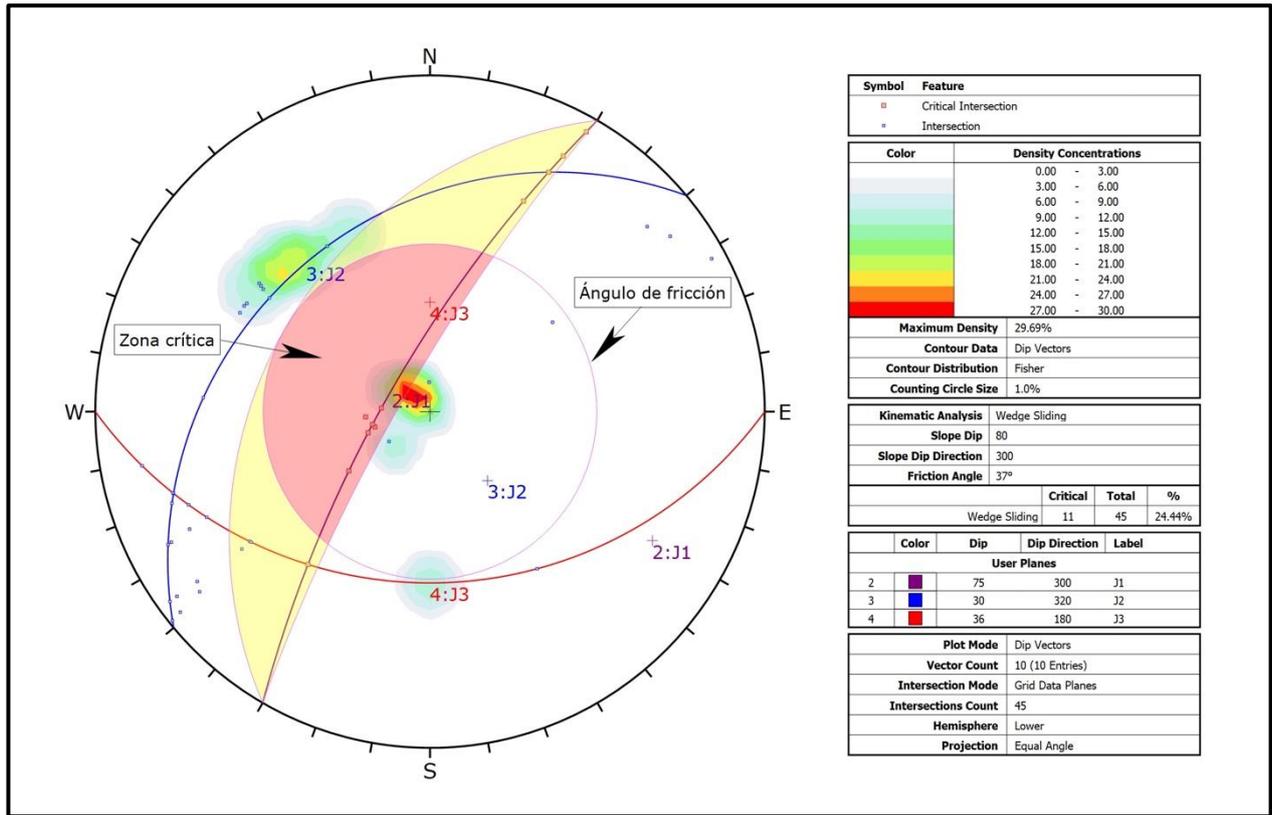


Figura 3.16. Análisis estereográfico del Talud 6, presenta fallas tipo cuña (Yáñez, 2021).



Figura 3.17. Estación geomecánica 06 (Yáñez, 2021).

3.1.3. Cálculo del RQD (Rock Quality Designation)

Los resultados obtenidos del cálculo para designar la calidad de la roca a partir de datos del número de fisuras por metro se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resumen de resultados del índice de calidad de la roca (Yáñez, 2021).

Talud	Litología	RQD (%)	Calidad
1	Andesita	77.25	Buena
2	Lavas indiferenciadas	84.42	Buena
3	Lavas indiferenciadas	73.58	Media
4	Volcanoclásticas grueso	84.42	Buena
5	Lavas indiferenciadas	69.90	Media
6	Lavas indiferenciadas	40.60	Mala

3.1.4. Cálculo del Q Slope

Para el cálculo del Q Slope se consideró cinco parámetros que se describieron uno a uno en el Capítulo II, se determinó valores de Q Slope para cada talud analizado como se describe en la Tabla 3.3. Una vez obtenido los valores de Q Slope se calificó la estabilidad del macizo rocoso, colocando en el eje X los valores de Q Slope y en el eje de la Y el ángulo de inclinación del talud en grados. De esta manera se puede emitir un criterio de las condiciones del talud que puede ser mantener el talud en las condiciones naturales o realizar un reforzamiento adecuado (ver Figura 3.18).

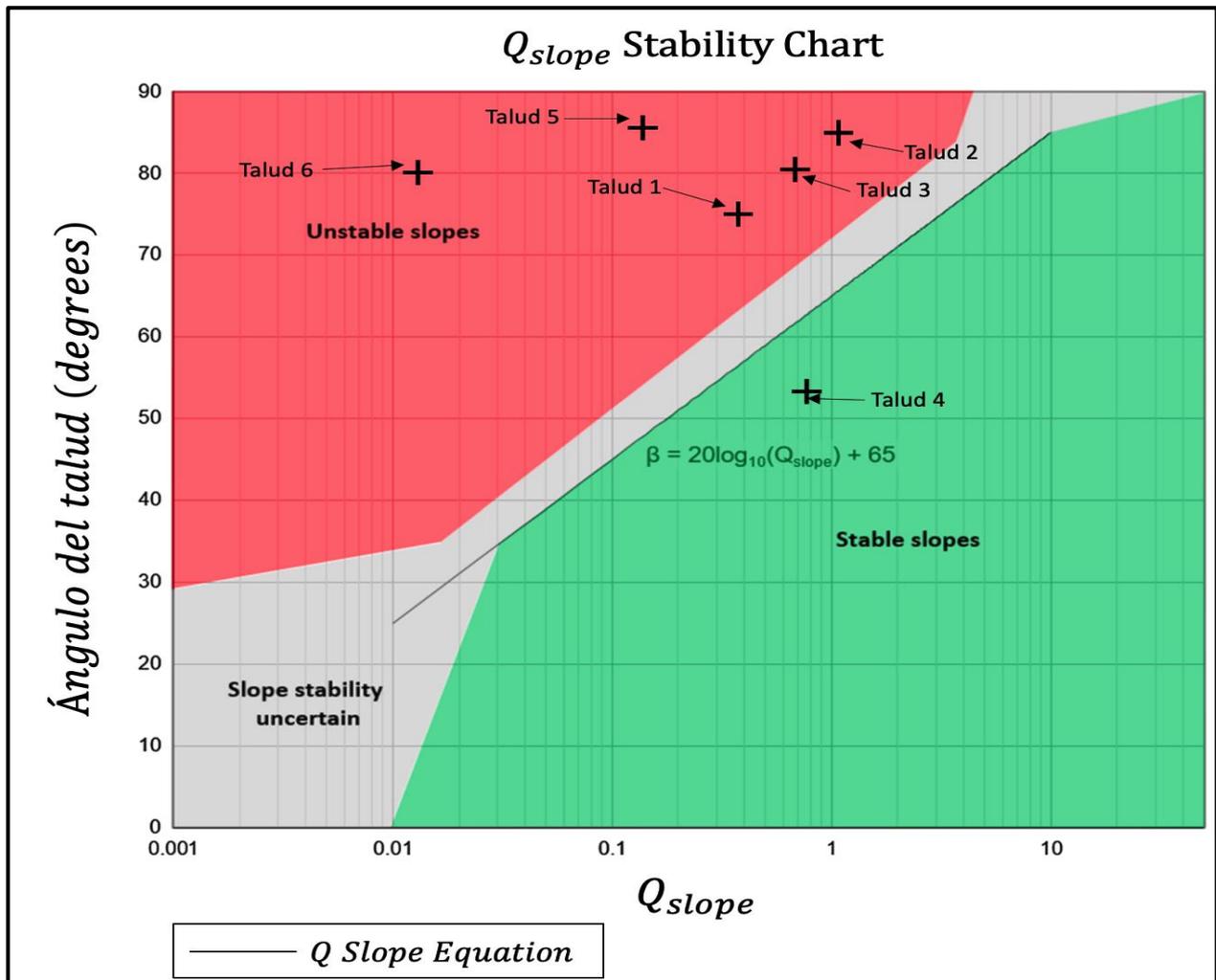


Figura 3.18. Gráfico de estabilidad de taludes usando el sistema Q Slope (Bar and Barton 2017).

Tabla 3.3. Cálculo de Q Slope, ángulo del talud y evaluación de la estabilidad (Yáñez, 2021).

<i>Talud</i>	<i>RQD</i>	J_n	$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)_0$	J_{wice}	SRF_{slope}	<i>Q Slope</i>	<i>Ángulo talud</i>	<i>Categorías de estabilidad (Q Slope)</i>	<i>Análisis cinemático</i>
1	77.25	4	0.28	0.7	4	0.39	75	Inestable	Cuña y vuelco
2	84.42	9	0.50	0.5	5	1.05	85	Inestable	Cuña y vuelco
3	73.58	4	0.36	0.5	5	0.68	81	Inestable	Plana y cuña
4	84.42	4	0.25	0.7	5	0.77	53	Estable	Cuña y vuelco
5	69.90	3	0.062	0.5	5	0.14	85	Inestable	Cuña
6	40.60	9	0.14	0.3	15	0.012	80	Inestable	Plana y cuña

3.2. Análisis de estabilidad

Para el análisis de estabilidad de los taludes estudiados, se realizó la evaluación geomecánica de los macizos rocosos, identificando el número de familias de discontinuidades, los resultados de las estaciones geomecánicas dan valores de RQD entre 69 - 84 %, determinando una calidad de roca de media a buena.

La caracterización geotécnica está conformada por una variedad de datos levantados en los taludes cuyos resultados demuestran con este trabajo la situación real por su relación que tienen con los diferentes tipos de falla, ya que estas hacen referencia a la dirección de sus planos de discontinuidad encontrados en el macizo rocoso.

La caracterización geotécnica es una ayuda muy importante para determinar la estabilidad de taludes en roca, como queda demostrado en esta investigación, al tomar datos de la caracterización geotécnica de los macizos rocosos los mismos que sirven como insumo de entrada para el análisis cinemático donde se identifica los diferentes tipos de falla presentes en un talud y su posterior análisis de estabilidad.

Los métodos de falla estructural están directamente relacionados con la orientación de las discontinuidades y la dirección del corte en los taludes al momento de construir la carretera. La estabilidad de los taludes está controlada por estructuras identificadas en las distintas familias de discontinuidades observadas cuando se realizó el análisis.

La aplicación de métodos empíricos como el Q Slope para el análisis de las condiciones físicas de los macizos rocosos y la interacción con software especializado en geotecnia, (Dips) dan resultados aceptables y confiables que asemejan la situación actual de los macizos rocosos analizados en este tramo vial.

Las proyecciones estereográficas generadas con el software Dips reportan cinco taludes con inestabilidad y uno con estabilidad, estos resultados indican que existe alta susceptibilidad a caída de rocas de los taludes, ya sea por sobrepasar los límites permisibles de probabilidad de falla o por su nivel de diaclasamiento (ver tabla 3.4).

Tabla 3.4. Resultados de probabilidad de ruptura según el software Dips (Yáñez, 2021).

Talud	Análisis cinemático			Condición
	Probabilidad de ruptura			
	Plana (%)	Cuña (%)	Vuelco (%)	
1	--	15.56	20.00	Inestable
2	--	33.33	46.67	Inestable
3	66.67	52.78	--	Inestable
4	--	6.67	10.00	Estable
5	--	88.89	--	Inestable
6	10.00	24.44	--	Inestable

Una vez realizado el análisis de los resultados obtenidos con el método Q Slope y teniendo en cuenta la calidad real de los macizos rocosos, derivados de la observación visual y el procesamiento de cada uno de los parámetros evaluados, se propone el uso del método empírico Q Slope para la caracterización rápida de taludes en roca por la información que proporciona y su parecido con la realidad, permitiendo tomar decisiones rápidas y concretas para la reducción de riesgos en la infraestructura vial sin incurrir en gastos para la implementación de proyectos preliminares.

CAPÍTULO 5

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Las características geotécnicas descritas en los taludes están condicionadas por el tipo de geología y estructuras de los macizos rocosos. Para esta investigación se recopiló información de: litología, alteración, resistencia a la compresión simple, ángulo de fricción básico, ángulo de fricción residual, influencia de condiciones ambientales entre otras, estos parámetros fueron medidos directamente en campo.
- En términos generales el macizo rocoso puede clasificarse como de calidad media a buena en cinco de los seis taludes analizados, y uno se lo clasificó como de mala calidad, por la variación que presenta el RQD desde 40.60 a 84.42 %.
- Los modos de fallo estructural controlados por la dirección de las discontinuidades, altura, pendiente, orientación del talud y ángulo de fricción residual de las discontinuidades, se determinaron a través del porcentaje de probabilidad de falla, considerando el tipo de falla y su porcentaje. Como resultado encontramos en primer lugar la falla tipo cuña con 88.89 %, le sigue la falla plana con 66.67 % y finalmente la falla tipo vuelco con 46.67 %, resultados que se reflejan en las estructuras de los macizos rocosos.
- Uno de los factores que influye directamente en la calidad del macizo rocoso son las constantes precipitaciones a la que se exponen los taludes, acelerando los procesos de meteorización, ocasionando que la calidad del afloramiento sea de media a buena.
- El tipo de falla plana se reportó en las estaciones geomecánicas 03 y 06, por presentar discontinuidades con orientaciones subparalela a los taludes y que buzan en sentido de la cara del talud, formando planos por donde caen fragmentos de roca desprendidos.
- El tipo de falla por cuña producto de la interacción de dos discontinuidades que forman un ángulo oblicuo y con una línea de intersección que buza en sentido de la cara del talud se identificó todas las estaciones geomecánicas analizadas.

- Las estaciones geomecánicas 01, 02 y 04 registran falla tipo vuelco por presentar una de sus juntas con orientación subparalela al talud, pero con un buzamiento contrario a la cara del talud, dando como resultado caída de bloques principalmente por acción de la gravedad.
- La estación geomecánica 04 reporta un talud estable ya que ninguna de las familias de diaclasas afecta de manera significativa obteniendo un puntaje de 84.42 % de RQD, por lo que se lo clasificó como un afloramiento de buena calidad.
- Los resultados del análisis empírico Q Slope clasifican a la roca como mala para el talud 1, como muy mala para los taludes 2, 3, 4, 5 y como extremadamente mala para el talud 6.
- La clasificación geomecánica Q Slope nos permitió caracterizar la estabilidad de seis taludes en la vía Guaranda – Echeandía, los mismos que no superan una altura de 30 m, arrojando resultados muy cercanos a la realidad.

4.2. Recomendaciones

- Usar el método empírico Q Slope para caracterizar taludes de alturas mayores a 30 m en la zona andina de Ecuador, complementando con ensayos de laboratorio que permitirán determinar parámetros geotécnicos más exactos que permitan validar este tipo de investigaciones.
- Se recomienda que los taludes que se han clasificados como inestables sean realicen estudiados a detalle para determinar con precisión los refuerzos que habrá que colocar, resistencia y ubicación para obtener los factores de seguridad adecuados, con la finalidad de implementar obras para la corrección ya sea usando anclajes de acero, la construcción de muros de concreto, drenajes, etc.
- Realizar la estimación in situ del volumen exacto de material susceptible a colapsar manteniendo los detalles y de forma conservadora ya que los métodos indirectos podrían subestimar la realidad en alguna medida.
- Que las instituciones encargadas de la construcción de vías en la provincia Bolívar incluyan esta metodología de evaluación acompañado de estaciones geomecánicas de detalle como una herramienta de trabajo. El conocimiento de las condiciones de estabilidad de un talud, usando variables como: calidad de la roca, número de familias de discontinuidad, rugosidad, esfuerzos y condiciones ambientales permiten disminuir los riegos y la paralización de obras.

BIBLIOGRAFÍA

- Bar Neil, & Barton Nick. (2016). Empirical Slope Design for Hard and Soft Rocks Using Q-slope. *ARMA U.S. Rock Mechanics Geomechanics Symposium, ARMA-2016-384*, 1–1.
- Bar Neil, & Barton Nick. (2017). The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mech Rock Eng*, 3308–3310.
- Bar Neil, & Barton Nick. (2018). Rock Slope Desing using Q-slope and Geophysical Survey Data. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 1–2.
- Barton Nick, Lien R, & Lunde J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Desing of Tunnel Support. *Springer*, 6, 191–194.
- Bernal Claudia. (2017). *Análisis geotécnico en el talud vertical dentro de una zona residencial en Hermosillo, Sonora: Proyecciones Estereográficas, clasificación geotécnica y estabilización.*
- Bieniawski Z. (1973). *Engineering classification of jointed rock masses* (N12 ed., Vol. 15).
- Cervantes José. (2003). Clasificación geomecánica y análisis estabilidad de taludes del macizo rocoso Coris, Cartago, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 28, 2–5.
- Escorza L. (1993). *Levantamiento Geológico de la depresión de Guaranda.*
- Flores Cristián, & Pineda Andrés. (2015). *Caracterización del macizo rocoso - análisis retrospectivo y aplicación al diseño de taludes mediante análisis cinemático y clasificación geomecánica - Slope Mass Rating - Cantera BRONCONS en el km 6 1/2 de la Av. del Bombero, Guayaquil, Guayas, Ecuador.*
- GAD cantonal. (2014). *Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial.*
- GAD cantonal. (2018, December). *Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial. Sistema Nacional de Información.*
- Gaona Cesar, & Rodríguez Edwin. (2019). *Equipos para ensayos de Tilt Test y carga puntual.*
- Garzón Julio, & Torrijo Javier. (2018). *Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por vuelco (Toppling).*
- González Luís, Ferrer Mercedes, Ortuño Luís, & Oteo Carlos. (2002). *Ingeniería Geológica* (Pearson educación).

- Huchamaco Reynaldo. (2018). *Mejoramiento de plan de minado para la optimización de producción en la contrata minera Wilsader de la corporación minera ANANEA S.A.*
- Hughes Richard, & Pilatasig Luís. (2002). Cretaceous and Tertiary terrance accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345, 32–34.
- Jordá Luís, Jover Roberto, Rodríguez Manuel, & Fernández Antonio. (2015). *Manual de estaciones geomecánicas y descripción de macizos rocosos en afloramientos.*
- Jordá-Bordehore Luís, & Herrera Raquel. (2018). Rapid field test for shear strength characterization of dacite at Cerro Rico de Potosi (Bolivia): tilt test with a Schmidt. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(143–9529), 870–875.
- Karzulovic Antonio. (2002). Método del índice Q. *Sistemas de Calificación y Clasificación Geotécnica de Macizos Rocosos*, 2–7.
- Lavenu Alain. (2006). Neotectónica de los andes entre 1° N y 47° S (Ecuador, Bolivia y Chile): una revisión. *Asociación Geológica Argentina*, 61, 505–508.
- McCourt J, Duque P, Pilatasig Luís, & Villagómez R. (1997). *Mapa Geológico de la cordillera occidental del Ecuador entre 1° - 2° S.*
- Melentijevic Svetlana. (2005). *Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada.*
- Mohammad Azarafza, Yaser A. Nanekaran, Lila Rajabion, Haluk Akün, Jafar Rahnamarad, Reza Derakhshani, & Amir Raof. (2020). *Application of the modified Q-slope classification system for sedimentary rock slope stability assessment in Iran.* 264, 1–2.
- Morales Mario. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke.*
- Rivadeneira Francisco, Segovia Mónica, Alvarado Alexandra, Egred José, Troncoso Liliana, Vaca Sandra, & Yepes Hugo. (2007). Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador. In Ortega Jorge (Ed.), 1 (Editorial Nacional, Vol. 1, pp. 15–20). Español.
- Romana M, Tomás R, & Serón B. (2015). *Slope Mass Rating (SMR) Geomechanics Classification: thirty years review.* 2–4.
- Siddique Tariq, Mosrorr Alam, Mondal M.E.A, & Vishal V. (2015). Slope mass rating and kinematic analysis of slope along the national highway-58 near Jonk, Rishikesh, India. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7, 600–601.
- Vergara Emilio. (2020). *Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en el área del embalse ralco, comuna de alto Biobío, región del Biobío, Chile.*