

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE LOS MACIZOS ROCOSOS EN EL CERRO
CARAMBAYO PARA INESTABILIDAD DE LADERAS, PARIAMARCA –
CAJAMARCA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO GEÓLOGO**

AUTOR:

Briones Inciso, Jesús Martín

ASESOR:

M. Cs. Ing. Gonzales Yana, Roberto Severino

Cajamarca, 2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

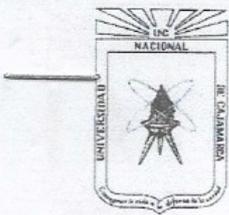
- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- 1. Investigador:** JESÚS MARTÍN BRIONES INCISO
DNI: 70207800
Escuela Profesional: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
- 2. Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino
Facultad: Ingeniería
- 3. Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- 4. Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- 5. Título de Trabajo de Investigación:**
ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE LOS MACIZOS ROCOSOS EN EL CERRO CARAMBAYO PARA
INESTABILIDAD DE LADERAS, PARIAMARCA – CAJAMARCA
Fecha de evaluación: 20/08/2025
- 6. Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- 7. Porcentaje de Informe de Similitud:** 4%
- 8. Código Documento:** Oide:3117: 485050209
- 9. Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 20/08/2025

	 <p>Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 20/08/2025 17:59:26-0500</p>
<hr/> FIRMA DEL ASESOR <i>Roberto Severino Gonzales Yana</i>	<hr/> UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE LOS MACIZOS ROCOSOS EN EL CERRO CARAMBAYO PARA INESTABILIDAD DE LADERAS, PARIAMARCA - CAJAMARCA.

ASESOR : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0559-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 29 de agosto de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **tres días del mes de setiembre de 2025**, siendo las once horas (11:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

- Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
- Vocal : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
- Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE LOS MACIZOS ROCOSOS EN EL CERRO CARAMBAYO PARA INESTABILIDAD DE LADERAS, PARIAMARCA - CAJAMARCA, presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica JESÚS MARTÍN BRIONES INCISO, asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 04 PTS.
 EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
 EVALUACIÓN FINAL : 15 PTS QUINCE (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de QUINCE acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 12.00 pm horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A mi alma máter, la Universidad Nacional de Cajamarca, por brindarme los conocimientos y valores que todo profesional debe tener. A mis docentes de la EPIG que fueron guía en mi desarrollo académico, y sobre todo por el conocimiento brindado.

J.M.B.I.

DEDICATORIA

A mi familia por ser un motivo muy importante para seguir cumpliendo mis metas y sueños, a mis padres por todo el apoyo que me brindaron para no rendirme jamás y seguir consiguiendo mis metas y sueños.

J.M.B.I.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE	iv
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.1.1. Antecedentes Internacionales	4
2.1.2. Antecedentes Nacionales	5
2.1.3. Antecedentes Locales	6
2.2. BASES TEÓRICAS	7
2.2.1. Laderas y Taludes	7
2.2.2. Deslizamientos	8
2.2.3. Mecánica de Rocas	10
2.2.4. Mecanismos de Roturas	11
2.2.5. Criterio de Rotura	11
2.2.6. Métodos de Clasificación de Macizos Rocosos – (RMR)	12
2.2.7. Mecanismos de Falla	17
2.2.8. Análisis de Estabilidad	19
2.2.9. Zonas Sísmicas del Perú	21
2.3. DEFINICIONES DE TÉRMINOS BÁSICOS	22

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN	24
3.1.1. Geográfica	24
3.1.2. Política	24
3.1.3. Accesibilidad	25
3.2. PROCEDIMIENTOS	25
3.2.1. Tipo y Diseño de Investigación	25

	Pág.
3.2.2. Población de Estudio	25
3.2.3. Muestra	26
3.2.4. Unidad de Análisis	26
3.3. DEFINICIÓN DE VARIABLES	26
3.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	26
3.4.1. Revisión y Consolidación de la Información.....	26
3.4.2. Etapa de Campo	27
3.4.3. Etapa de Análisis e Interpretación	27
3.4.4. Elaboración de la Tesis de Investigación	27
3.5. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS	27
3.6. GEOLOGÍA LOCAL	30
3.6.1. Grupo Goyllarisquizga	30
3.6.2. Cuaternario	31
3.7. GEOMORFOLOGÍA	32
3.7.1. Unidades Morfogenéticas	32
3.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	35
3.8.1. Falla normal inferida	35
3.8.2. Diaclasamiento	35
3.9. PRECIPITACIÓN	36
3.10. SISMICIDAD	37
3.11. ANÁLISIS GEOTÉCNICO	38
3.11.1. Estación N°01.....	39
3.11.2. Estación N°02.....	46
3.11.3. Estación N°03.....	54
3.11.4. Estación N°04.....	60
3.11.5. Estación N°05.....	67

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	78

CAPÍTULO V.**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1. CONCLUSIONES	79
5.2. RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXO 01. PLANOS	83
PLANO 01: PLANO DE UBICACIÓN	83
PLANO 02: PLANO GEOLÓGICO	83
PLANO 03: PLANO DE PENDIENTES	83
PLANO 04: PLANO GEOMECÁNICO – RMR Y GSI	83
PLANO 05: PLANO DE ANÁLISIS DE FALLA – DIPS	83
PLANO 06: PLANO DE ESTABILIDAD DE TALUDES – SLIDE	83

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de Clasificación RMR.	14
Tabla 2. Índice de la Calidad de RMR.	15
Tabla 3. Clasificación Geomecánica de GSI.	16
Tabla 4. Clasificación del Índice de Calidad de la Roca (RQD).	17
Tabla 5. Factores Condicionantes y Detonantes en la Estabilidad de Taludes	17
Tabla 6. Métodos de Análisis de Estabilidad de Taludes.	20
Tabla 7. Valores de los Coeficientes Sísmicos acorde a la zonificación.	22
Tabla 8. Delimitación de la zona de investigación.	24
Tabla 9. Accesibilidad a la zona de estudio.	25
Tabla 10. Definición de variables.	26
Tabla 11. Formato Geológico - Geotécnico.	29
Tabla 12. Unidades morfogenéticas según Rodríguez (2016).	33
Tabla 13. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.	40
Tabla 14. Valor obtenido de RMR y clasificación.	42
Tabla 15. Probabilidad de falla planar y cuña.	43
Tabla 16. Factor de Seguridad.	44
Tabla 17. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.	47
Tabla 18. Valor obtenido de RMR y clasificación.	49
Tabla 19. Probabilidad de falla planar y cuña.	50
Tabla 20. Factor de Seguridad.	52
Tabla 21. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.	55
Tabla 22. Valor obtenido de RMR y clasificación.	57
Tabla 23. Probabilidad de falla planar y cuña.	58
Tabla 24. Factor de Seguridad.	58
Tabla 25. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.	61
Tabla 26. Valor obtenido de RMR y clasificación.	63
Tabla 27. Probabilidad de falla planar y cuña.	64
Tabla 28. Factor de Seguridad.	65
Tabla 29. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.	68
Tabla 30. Valor obtenido de RMR y clasificación.	70
Tabla 31. Probabilidad de falla planar y cuña.	71
Tabla 32. Factor de Seguridad.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Nomenclatura en “a” de Talud Artificial en “b” de Ladera Natural.....	8
Figura 2. Nomenclatura de las Partes que Conforman un Deslizamiento.	10
Figura 3. Cuantificación del valor de GSI.	15
Figura 4. Diagrama de lo que es la Rotura Planar.....	18
Figura 5. Diagrama de lo que es la Rotura en Cuña.	18
Figura 6. Diagrama de la Rotura por Pandeo o volcamiento.	19
Figura 7. Rupturas en Roca y Representación Estereográfica.....	19
Figura 8. Zonificación sísmica del Perú.....	21
Figura 9. Precipitación anual promedio.	36
Figura 10. Precipitación mensual promedio.....	37
Figura 11. Valor de Índice de Resistencia Geológica.	39
Figura 12. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.....	40
Figura 13. Abaco de corrección de valor de RQD.	41
Figura 14. Análisis de Roca utilizando RocData.	42
Figura 15. Análisis de posibilidad de rotura planar, Software Dips.	43
Figura 16. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips.	44
Figura 17. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.	45
Figura 18. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.	45
Figura 19. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.....	46
Figura 20. Valor de Índice de Resistencia Geológica.	47
Figura 21. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.....	48
Figura 22. Abaco de corrección de valor de RQD.	48
Figura 23. Análisis de Roca utilizando RocData.	50
Figura 24. Análisis de posibilidad de rotura planar, Software Dips.	51
Figura 25. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips.	51
Figura 26. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.	52
Figura 27. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.	53
Figura 28. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.....	53
Figura 29. Valor de Índice de Resistencia Geológica.	54
Figura 30. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.....	55
Figura 31. Abaco de corrección de valor de RQD.	56
Figura 32. Análisis de Roca utilizando RocData.	57

	Pág.
Figura 33. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips	58
Figura 34. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.	59
Figura 35. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.	59
Figura 36. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.	60
Figura 37. Valor de Índice de Resistencia Geológica.	61
Figura 38. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.	62
Figura 39. Abaco de corrección de valor de RQD.	62
Figura 40. Análisis de Roca utilizando RocData.	64
Figura 41. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips	65
Figura 42. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.	66
Figura 43. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.	66
Figura 44. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.	67
Figura 45. Valor de Índice de Resistencia Geológica.	68
Figura 46. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.	69
Figura 47. Abaco de corrección de valor de RQD.	69
Figura 48. Análisis de Roca utilizando RocData.	71
Figura 49. Análisis de posibilidad de rotura planar, Software Dips.	72
Figura 50. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips	72
Figura 51. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.	73
Figura 52. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.	74
Figura 53. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.	74

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Macizo rocoso de la Fm. Chimú. Carretera a Paríamarca.	31
Fotografía 2. Depósitos Aluviales que se encuentran al costado de la carretera.	32
Fotografía 3. Depósitos Aluviales se logran apreciar al costado de la carretera.	32
Fotografía 4. Planicie ubicada en la parte superior del cerro Carambayo.....	33
Fotografía 5. Lomada de 12°, ubicado al SW del cerro Carambayo.	34
Fotografía 6. Ladera en el acceso a Paríamarca. Pendiente de 32°.....	34
Fotografía 7. Se observa diaclasamiento (líneas amarillas). Estación N°01.	35

LISTA DE ABREVIATURAS

T	:	Tensión tangencial.
σ_n	:	Tensión normal.
c	:	Cohesión.
Φ	:	Ángulo de rozamiento.
m_i	:	Constante de roca intacta.
m_b	:	Valor reducido de la constante del material <i>mmmm</i> .
s, a	:	Constantes del macizo rocoso.
λ	:	Número promedio de discontinuidades por metro.
RMR	:	Rock Mass Rating.
RQD	:	Rock Quality Designation.
GSI	:	Geological Strength Index.
FS	:	Factor de Seguridad.
Mpa	:	Mega pascal
UTM	:	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator.
WGS-84	:	Sistema de Coordenadas Geográficas Mundial 1984.

RESUMEN

La investigación se centra en el análisis geotécnico de los macizos rocosos en el cerro Carambayo, Paríamarca - Cajamarca, con el objetivo principal de analizar geotécnicamente los macizos rocosos para inestabilidad de laderas. Para esto, se realizó una descripción geotécnica que permitió determinar las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, así como el comportamiento geotécnico mediante factores de seguridad. Se utilizó un enfoque metodológico que incluyó un diseño descriptivo y correlacional, abarcando la recolección de datos en campo y el análisis de variables externas como la precipitación y actividad sísmica. Se aplicó el criterio Hoek-Brown en RocData y Slide para evaluar la estabilidad bajo tres escenarios: condiciones naturales, saturación al 100% y combinación con sismicidad. En todos los casos, se evidenció una disminución significativa del factor de seguridad (FS). La estación N° 01 fue la más vulnerable (FS = 0.819 en escenario extremo), mientras que la estación N° 03 mostró mayor resistencia (FS = 0.783). Estos resultados reflejan la influencia directa de factores externos sobre la estabilidad del macizo y resaltan la necesidad de monitoreo y planificación geotécnica en zonas de alta pendiente y fracturamiento.

Palabras clave: Ladera, Factor de Seguridad, Software Slide, Inestabilidad.

ABSTRACT

This research focuses on the geotechnical analysis of rock masses on Cerro Carambayo, Paríamarca-Cajamarca, with the primary objective of geotechnically analyzing the rock masses for slope instability. To this end, a geotechnical description was performed to determine the geomechanical properties of the rock masses, as well as their geotechnical behavior using safety factors. A methodological approach was used that included a descriptive and correlational design, encompassing field data collection and the analysis of external variables such as precipitation and seismic activity. The Hoek-Brown criterion was applied in RocData and Slide to evaluate stability under three scenarios: natural conditions, 100% saturation, and combined with seismic activity. In all cases, a significant decrease in the factor of safety (FS) was evident. Station 1 was the most vulnerable (FS = 0.819 in the extreme scenario), while Station 3 showed greater resistance (FS = 0.783). These results reflect the direct influence of external factors on the stability of the massif and highlight the need for geotechnical monitoring and planning in areas of steep slopes and fracturing.

Keywords: Slope, Safety Factor, Software Slide, Instability.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

La roca es definida como un agregado sólido, siendo formado por uno o varios minerales ocupando grandes extensiones en la corteza terrestre. En la naturaleza las rocas obtienen características geológicas estructurales y al mismo tiempo discontinuidades, por ejemplo: estratificación, esquistosidad, pliegues, fallas y juntas o diaclasas. Teniendo así un comportamiento heterogéneo y/o anisotrópico. Un macizo rocoso que se encuentra en una ladera, que contenga un sistema de discontinuidades puede pasar de ser estable a inestable al ser interceptado por un plano de talud, obteniendo deslizamientos de tipo planar y/o de cuña. Para el primero tipo planar solo se debe interceptar por un plano, mientras que, para el tipo cuña se necesita al menos dos discontinuidades planas. Al considerar estas propiedades heterogéneas, encontramos en el cerro Carambayo afloramientos de rocas silíceas de la Formación Chimú. Las cuáles contienen un fuerte diaclasamiento y a su vez presenta procesos altos de meteorización, siendo estos últimos los que alteran las propiedades de las rocas. El resultado de esta alteración es la inestabilidad de las laderas con deslizamientos de tipo planar y cuña. El análisis que se ha realizado de las propiedades se hizo con el estudio en campo, tomando en cuenta y aplicando conocimientos de geología y geomecánica de rocas. Posteriormente serán analizadas mediante softwares del paquete de Rocscience como Dips v6, RocData v4 y Slide. Esto servirá para resolver nuestra pregunta principal que es ¿Cuál es el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos en el cerro Carambayo para inestabilidad de laderas, Paríamarca - Cajamarca?

La hipótesis de esta investigación como respuesta a la pregunta principal es que los afloramientos de macizos rocosos ubicados en el cerro Carambayo, se encuentran afectadas por fracturas, las cuales han sido causadas por familias de discontinuidades y la precipitación anual. Estos llegan a modificar su comportamiento geotécnico, disminuyendo y alteran la estabilidad, por lo que al

encontrarse en zonas de laderas y con la presencia de saturación total y sismicidad también se alteran sus propiedades geotécnicas. Como consecuencia causa una inestabilidad de laderas. Siendo que los datos obtenidos de campo y su análisis mediante Dips v6, RocData v4 y Slide brindará una interpretación de su comportamiento geotécnico.

En el cerro Carambayo encontramos afloramientos de rocas silíceas, que se encuentran en contacto con procesos de meteorización y diaclasamiento, lo cual, causa inestabilidad en las laderas, causando así daños económicos y pérdida de vidas humanas por los deslizamientos de tipo planar y cuña. Por ello se realiza esta investigación para identificar la calidad de los macizos rocosos en las laderas y así analizar su riesgo geotécnico. Esta investigación se llevará a cabo tomando datos necesarios en campo, para posteriormente realizar el análisis e interpretación mediante softwares y dando como resultado un factor de seguridad que determinará las características geotécnicas de las rocas silíceas. No obstante, las investigaciones previas que se han realizado en el cerro Carambayo necesitan ser complementadas con más trabajos de investigación, siendo este el motivo para realizar este trabajo de investigación, afianzando los conocimientos previos y siendo una base para futuras investigaciones. Para esto el trabajo de investigación será de carácter explicativo, analizando las características geomecánicas y determinando relación de estas con la estabilidad geotécnica de las laderas que existen en el cerro Carambayo ubicado en el centro poblado de Paríamarca en el distrito de Cajamarca.

Teniendo como objetivo principal: Analizar el comportamiento geotécnico los macizos rocosos en el cerro Carambayo para inestabilidad de laderas, Paríamarca - Cajamarca. Este se desglosa en tres objetivos específicos los cuales ayudan a desarrollar la investigación, y estos son: realizar la descripción geotécnica para determinar las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, definir el comportamiento geotécnico mediante los factores de seguridad y analizar la probabilidad de falla de los macizos rocosos mediante los softwares Dips v6, RocData v4 y Slide.

La investigación se estructuró en cinco capítulos. En el capítulo II Marco Teórico, se tienen los antecedentes de tipo internacional, nacional y local; además bases teóricas sobre la geomecánica y geotecnia, como también la definición de términos básicos. El capítulo III corresponde a los materiales y métodos, en donde se tendrá la ubicación, procedimientos y metodología de la investigación. En el capítulo IV se presenta el análisis y discusión de resultados, donde se describe, discute y explica los resultados obtenidos. En el capítulo V, corresponde a las conclusiones a las que se llegó teniendo en cuenta los objetivos; asimismo se presenta las recomendaciones a tener en cuenta y también se tienen las referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Coello (2020), Caracterización geomecánica del talud de roca en la zona de San Eduardo, Av. Barcelona Sporting Club, Guayaquil, Ecuador, en este estudio se identificó, calificó y caracterizó zonas mecánicas en el tramo de ingreso al túnel San Eduardo. Se utilizó información geotécnica – geofísica, como también la metodología de Bieniaswki determinando zonas de clase V (muy mala) y de clase IV (mala inestable) y clase III (normal parcial estable). Por otro lado, esta información obtenida de campo fue procesada a través de los softwares de Rocscience como Roc Data, Roc Plane y Dips, de esta manera se generaron modelos digitales y análisis para deslizamientos planares y cuña.

Oros (2018), Estudio geológico-geotécnico para la estabilidad de taludes en el Departamento de Potosí Bolivia, en este estudio se brindaron los parámetros físico-mecánicos para el análisis de estabilidad, diseño y tratamiento de taludes. Tiene el objetivo de prevenir y controlar los desastres causados por los deslizamiento y rotura de los taludes, con contexto de una construcción civil. Esta determinación se hizo con el análisis de los métodos de SMR – RMR y a través de FELLENUM se obtuvo una estabilización y solución teórica a los problemas conocidos. Obtuvo como resultados, en la progresiva 67+000, un RQD = 26 siendo una roca mala y con un RMR = 34, esto es un Roca Mala. En la progresiva 51 + 900 un RQD = 9, Roca Muy Mala, y un RMR = 26 siendo un Roca Mala. Con el procesamiento de estos resultados calculó su factor de seguridad, de las cuales en ambas es menor a 1.00, siendo un factor de seguridad bajo e inestable.

Mucuta et al, (2020), Evaluación de estabilidad en taludes del yacimiento Castellano mediante el cálculo del factor de seguridad. Este estudio desarrolló el objetivo de calcular el factor de seguridad en tres escenarios, los cuales fueron representados por tres taludes. Estos taludes se etiquetaron como frentes I, II y III, todos estos bajo dos condiciones, el primero incluyó el coeficiente sísmico de la región y el segundo no se incluyó este coeficiente. Para el análisis de sus valores de campo se utilizó el software Slide v6.0. De cada uno de los tres escenarios analizados del yacimiento Castellano son inestables bajo las dos situaciones de sismicidad evaluadas, se obtuvieron valores entre 0.281 y 0.444, las cuales se encuentran muy debajo de 1.3 que es el valor límite de estabilidad. Esto indicó la necesidad de implementar medidas de estabilización, como también la construcción de zanjas de drenaje.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Rivasplata (2019), Determinación de inestabilidad de taludes en las zonas críticas en la carretera Celendín – Balsas, en este estudio se analizó el comportamiento geodinámico inestable en los afloramientos de rocas y suelos inestables en los taludes de la carretera, obteniendo datos de campo los cuales se procesaron en los softwares de Rocscience, Slide v.6.0 y Dips v.6. Determinando los factores que influencia esta inestabilidad siendo los más resaltantes la geología, comportamiento estructural y factores hidrológicos.

Valdera (2019) evaluó el comportamiento geomecánico y geotécnico de la carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, analizando ocho taludes críticos de los Grupos Crisnejas y Pulluicana. Utilizó clasificaciones geomecánicas y el software RocData v.4.0 para determinar fricción y cohesión, además de Dips v.6.0 para un análisis cinemático que identificó roturas tipo cuña y planar. Con Slide v.6.0 calculó Factores de Seguridad bajo seis condiciones, mostrando inestabilidad en 3 taludes en saturación total, 1 en saturación parcial con sismicidad y 7 en saturación total con sismicidad.

Rivera (2022), Estabilidad de taludes en la carretera Cruz Blanca – Choten, Cajamarca. Esta investigación tiene el objetivo de determinar la estabilidad de

taludes adenaños en la carretera Cruz Blanca – Choten, el cual se hizo a partir de la descripción geomecánica, los suelos y macizos rocosos. Estos forman los principales tipos de materiales geológicas que se encuentra en la carretera, los cuales dependiendo a sus propiedades afectan a la estabilidad de los taludes. Los resultados obtenidos en las estaciones 1 y 3 con RMR de 54 y 57, ubicadas en la Formación Santa, con factores de seguridad de 1.56 y 1.61 respectivamente, en la estación 5 se tuvo un RMR de 61 y un factor de seguridad de 1.40, estas estaciones tienen valores de RMR relativamente bajos pero un valor de estabilidad mayor a 1.

2.1.3. Antecedentes Locales

Marín (2019), Determinación geomecánica de taludes en zonas críticas en la carretera San Juan – Huacraruco entre los kilómetros 3 + 000 – 6 + 200, en este estudio se hizo el análisis del comportamiento geotécnico de los taludes, también como los factores de influencia en la inestabilidad, los que son precipitación, sismicidad y factores geométricos del talud. Estos datos que se obtuvieron en campo fueron procesados y analizados mediante softwares DIPS y software Rock Data, para luego ser aplicados en el software Slide obteniendo diferentes valores de Factor de Seguridad, siendo estos valores fundamentales para cuantificar y evaluar la inestabilidad de los taludes.

Arteaga (2017) analizó los taludes de la carretera Choropampa – Magdalena, compuestos por depósitos cuaternarios (aluviales, deluviales y coluvio-aluviales), las Formaciones Chúlec y Pariatambo, el Grupo Pulluicana e intrusivos dioríticos. Las condiciones meteorológicas, especialmente las lluvias intensas, incrementan la inestabilidad de los taludes. Se estudiaron 15 taludes mediante el método de equilibrio límite en Slide v7.0, determinando parámetros geomecánicos con RocData v5.0 y aplicando los criterios de Mohr-Coulomb para suelos y Hoek-Brown para rocas. Los factores de seguridad fueron evaluados bajo condiciones normales, saturación y sismicidad, identificándose el tramo más inestable entre el Km 116+500 y el Km 118+000, con los factores de seguridad más bajos.

Caruanambo (2017), Evaluación geomecánica de los taludes de la carretera Encañada – Celendín en el tramo Km. 32 + 000 – Km. 46 + 000, en esta

investigación se analiza la inestabilidad que presentan los tramos de carreteras. Se definió las características geomecánicas a lo largo de la carretera para poder determinar finalmente su factor de seguridad, especialmente en los tramos críticos. Para esto se hizo un análisis mediante tablas donde se obtuvieron datos del macizo rocoso y propiedades de las discontinuidades para el cálculo de su RMR. Además de esto se obtuvieron datos de campo, los cuales se procesaron en el software RocData v5 para obtener las propiedades geomecánicas necesarias como datos de entrada. Se obtuvieron valores de factor de seguridad, donde sus tramos inestables varían entre 0.5 y 1.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Laderas y Taludes

De acuerdo con las investigaciones de Suarez en 2007, se puede entender que los taludes y laderas se refieren a áreas de terreno que no presentan una superficie plana, sino que muestran pendientes y variaciones significativas en su altitud.

En términos técnicos, se distingue entre "laderas" cuando su formación actual es de origen natural y "taludes" cuando su origen es resultado de la acción humana.

En el transcurso del tiempo, tanto las laderas como los taludes pueden enfrentar tanto factores naturales como intervenciones humanas pueden alterar la resistencia del suelo y la configuración topográfica original.

En este sentido, las laderas se consideran formaciones geológicas que han evolucionado en el entorno natural a lo largo del tiempo, mientras que los taludes son resultado de actividades antropogénicas que alteran la configuración del terreno original.

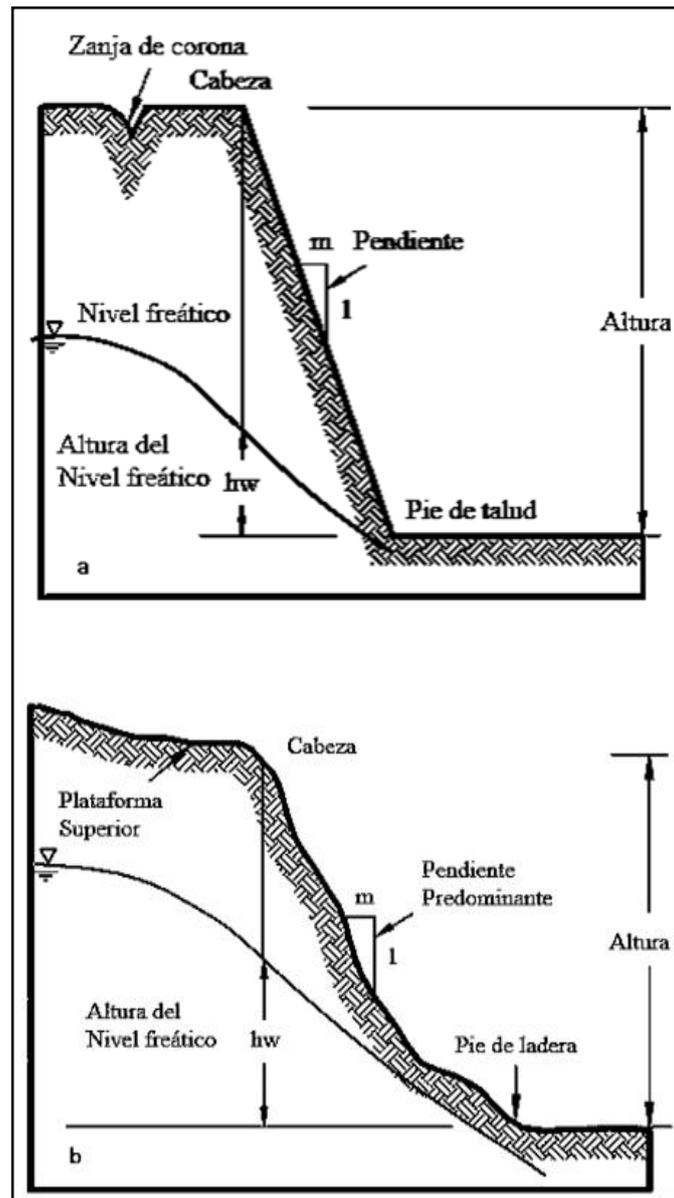


Figura 1. Nomenclatura en "a" de Talud Artificial en "b" de Ladera Natural.
Fuente: Suarez, (2007).

2.2.2. Deslizamientos

Desplazamientos hacia abajo de masas de rocas y suelo debido a la influencia de la gravedad y la acción del agua, que ocurren principalmente a lo largo de superficies de falla. La inestabilidad se genera a partir de la interacción de procesos de erosión y desgaste, donde los procesos erosivos tienden a afectar a capas subsuperficiales, mientras que los procesos de desgaste activan la erosión a mayor profundidad en el perfil (Suarez, 2007). Según la clasificación de Suarez (2007), las partes constituyentes de un deslizamiento son las siguientes:

- **Base:** área situada bajo la base de la superficie de falla, oculta por el material desplazado.
- **Cabeza:** la parte superior del deslizamiento, que no necesariamente coincide con la cima del talud.
- **Cima:** punto más elevado de la cabeza, donde se encuentra el contacto entre el material intacto y el escarpe principal.
- **Corona:** área superior del escarpe principal, ubicada por encima de la cabeza y compuesta por material inalterado.
- **Costado o flanco:** lado derecho o izquierdo del deslizamiento.
- **Cuerpo principal del deslizamiento:** la masa de tierra o roca que ha sido desplazada por encima de la superficie de falla.
- **Derecha e izquierda:** al describir un deslizamiento, es recomendable utilizar coordenadas geográficas como Norte, Sur, Este u Oeste. Si se usan términos como derecha o izquierda, la descripción debe hacerse observando desde la corona hacia el pie del deslizamiento.
- **Escarpe principal:** la pendiente pronunciada a lo largo de la parte posterior del deslizamiento, resultado del desplazamiento del material.
- **Escarpe secundario:** superficie inclinada resultante de desplazamientos diferenciales; dentro de un deslizamiento, pueden formarse múltiples escarpes secundarios.
- **Pie de la superficie de falla:** el límite entre la parte inferior de la superficie de falla y el terreno original.
- **Punta o uña:** el punto más alejado de la base, que se encuentra más distante de la cima.
- **Superficie de falla:** superficie por debajo del deslizamiento, límite entre la masa desplazada y la masa estática.
- **Superficie original del terreno:** área original antes que suceda el deslizamiento.

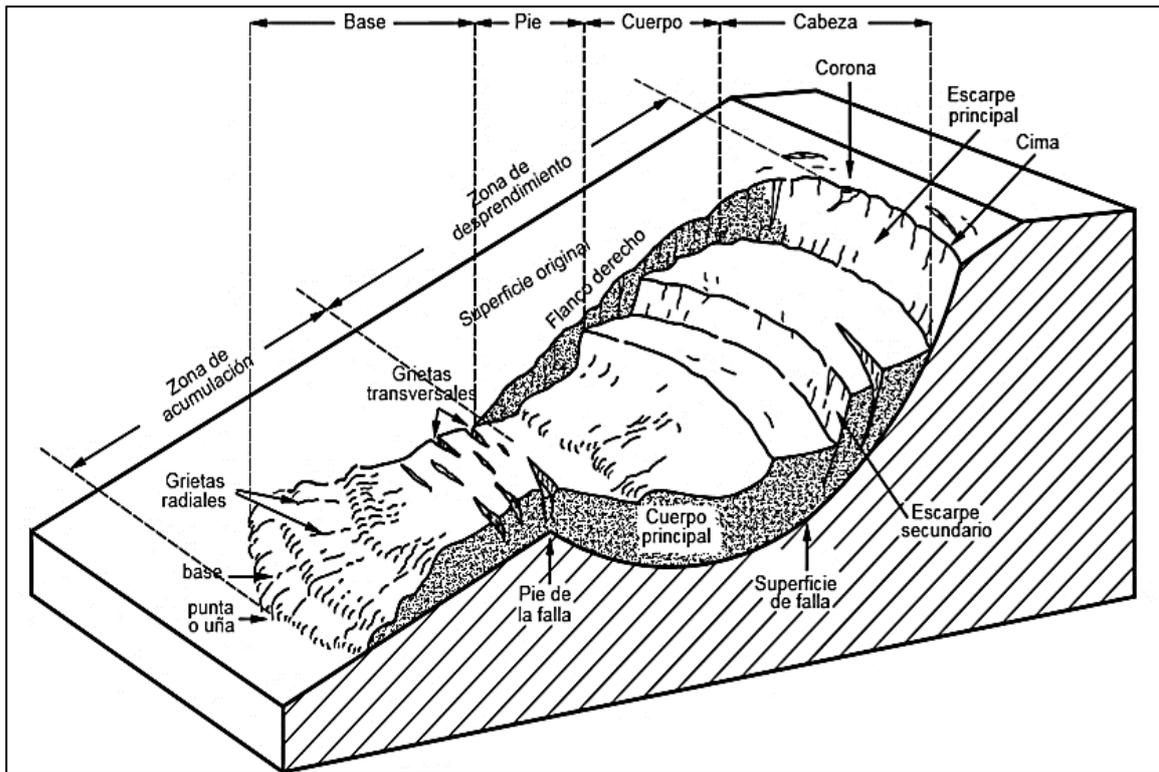


Figura 2. Nomenclatura de las Partes que Conforman un Deslizamiento.
Fuente: Suarez, (2007).

2.2.3. Mecánica de Rocas

La mecánica de rocas es una disciplina fundamental que se dedica a investigar y comprender cómo reacciona un macizo rocoso frente a las fuerzas tanto internas como externas que actúan sobre él. A través de un análisis minucioso de las tensiones y deformaciones que se generan en las rocas, se logra describir y predecir el comportamiento de diferentes tipos de formaciones rocosas en diversas condiciones. Uno de los aspectos esenciales en esta área de estudio es la relación entre las tensiones ejercidas sobre las rocas y las deformaciones resultantes. Esta relación proporciona información crucial sobre la respuesta elástica y plástica de las rocas ante la aplicación de fuerzas. De esta manera, se pueden determinar parámetros importantes como la resistencia de las rocas a la compresión, la tracción y la flexión, lo que resulta fundamental para la ingeniería geotécnica y la planificación de proyectos de construcción en entornos rocosos. Un aspecto particularmente influyente en la mecánica de rocas es la presencia de discontinuidades y planos de debilidad dentro de las masas rocosas. Estos elementos juegan un papel dominante en los procesos de deformación y rotura de

las rocas, ya que pueden actuar como puntos de concentración de tensiones y puntos iniciales de fractura. Las fisuras, fallas y otros tipos de discontinuidades pueden influir significativamente en la estabilidad de un macizo rocoso, especialmente cuando se somete a cargas externas como la presión del agua, el peso de la tierra o las fuerzas sísmicas (González de Vallejo, 2004).

2.2.4. Mecanismos de Roturas

De acuerdo con González de Vallejo (2004), se señala que los procesos de fractura involucran una interacción de múltiples elementos, lo que contribuye a su naturaleza intrincada, abarcando una serie de factores interrelacionados como:

- **Rotura por Compresión:** cuando las fuerzas de compresión ejercen presión sobre la roca, se generan grietas microscópicas de tracción y planos de corte en su interior.
- **Rotura por Esfuerzo Cortante:** cuando una superficie de la roca se desplaza en relación con otra, esto ocurre debido a la acción de fuerzas cortantes que actúan sobre esa región específica.
- **Rotura por Flexión:** cuando una porción de la roca experimenta tensiones normales que actúan en direcciones opuestas y se produce una ruptura a lo largo de la zona donde se acumulan estas fuerzas de tracción.
- **Rotura por Tracción:** cuando una determinada sección de la roca es expuesta exclusivamente a fuerzas de tracción, es decir, fuerzas que tiran o estiran la roca en direcciones opuestas.

2.2.5. Criterio de Rotura

- Criterio de Hoek-Brown Generalizado

El método empleado para evaluar la resistencia de la matriz rocosa bajo condiciones isotrópicas se basa en un criterio de ruptura no lineal, cuya representación gráfica toma forma de una curva cóncava, según lo indicado por González de Vallejo en 2004. Inicialmente, este criterio fue aplicado a masas rocosas extensas, frágiles e intactas, y se desarrolló a partir de las propiedades

inherentes de las rocas en su estado original. Con el tiempo, se incorporaron factores de ajuste que reducen estas propiedades para permitir la caracterización de macizos rocosos con diaclasas, como lo propusieron Hoek, Carranza, y Corkum en el 2002.

Criterio expresado como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

m_b valor reducido de la constante del material m_i y está dado por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

s y a son constantes del macizo rocoso, se expresan como:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

Cuando se trata de una roca en su estado original e intacto, las constantes del material se denotan como m_i ; donde $s = 1$ y $a = 0.5$. Aquí, D representa un factor que varía según el grado de alteración que haya experimentado el macizo rocoso debido a factores como explosiones o relajación de esfuerzos. Este factor D tiene un rango que abarca desde 0, que corresponde a macizos rocosos sin alteración, hasta ciertos valores superiores para macizos rocosos altamente modificados (Hoek - Brown, 2018).

2.2.6. Métodos de Clasificación de Macizos Rocosos – (RMR)

Se encuentran disponibles una variedad de enfoques de clasificación geomecánica que se aplican en la planificación de proyectos de ingeniería. Estos métodos tienen

como objetivo principal obtener los parámetros geomecánicos necesarios para describir las propiedades de los macizos rocosos.

➤ Clasificación del Macizo Rocosos (RMR) – Bieniawski (1989)

El sistema de clasificación propuesto inicialmente por Bieniawski en 1976 y posteriormente revisado por el mismo autor en 1989, proporciona una herramienta valiosa para establecer una relación entre los índices de calidad y los parámetros geotécnicos del macizo rocoso. En este sistema, los índices de calidad son evaluados en una escala que varía de 0 a 100, permitiendo una caracterización cuantitativa de las condiciones del macizo rocoso. El cálculo del Índice de Clasificación de Rocas (RMR) brinda la posibilidad de estimar diversos parámetros relacionados con la resistencia y deformabilidad del macizo. Esta información es esencial para comprender y prever el comportamiento potencial del macizo rocoso en respuesta a actividades de excavación (González de Vallejo, 2004).

El RMR cuenta con los siguientes parámetros:

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

Tabla 1.
Parámetros de Clasificación RMR.

Parámetros de clasificación RMR (Bieniawski 1989)									
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		> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	<0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	<10 litros/min	10-25 litros/min	10-125 litros/min	> 125 litros/min		
		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).

Tabla 2.
Índice de la Calidad de RMR.

Clase	Calidad	Valoración (RMR)
I	Muy Buena	100 - 81
II	Buena	80 - 61
III	Regular	60 - 41
IV	Mala	40 - 21
V	Muy Mala	< 20

Fuente: González de Vallejo, (2004).

➤ Índice de Resistencia Geológica (GSI)

La clasificación mediante el Índice de Resistencia Geológica (GSI) se analiza a través de la siguiente tabla:

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.		CONDICIÓN DEL FRENTE					
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos	
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70				
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	50			
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30		
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y reondeados, con alto contenido de finos.				20	10	

Figura 3. Cuantificación del valor de GSI.

Fuente: González de Vallejo, (2004).

Tabla 3.
Clasificación Geomecánica de GSI.

Calidad del Macizo	Tipo	GSI
Muy mala	V	0-20
Mala	IV	21-40
Regular	III	41-60
Buena	II	61-80
Muy Buena	I	80-100

Fuente: Hoek E. et al., (2013).

➤ Índice de Calidad de Roca (RQD)

El Índice de Calidad de la Roca Desprendida (RQD, por sus siglas en inglés) se destaca como uno de los métodos más utilizados para la caracterización de macizos rocosos. El valor del RQD representa la proporción entre la suma de las longitudes de todos los fragmentos de roca desprendida que exceden los 10 cm, y la longitud total del tramo de muestra analizado.

Este índice brinda información esencial sobre la integridad y continuidad del macizo rocoso en un tramo dado. Cuanto mayor sea el valor del RQD, mayor será la cohesión y resistencia del macizo. Dado que el tamaño de las fracturas y discontinuidades es un factor clave en la estabilidad de las formaciones rocosas, el RQD se convierte en un parámetro valioso para evaluar la calidad geomecánica del macizo y su idoneidad para proyectos de construcción, excavación o ingeniería geotécnica (González de Vallejo, 2004).

$$RQD = 100 * e^{(-0.1\lambda)} * (0.1\lambda + 1)$$

Donde λ es el número promedio de discontinuidades por metro.

$$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ discontinuidades}}{(L)m}$$

Tabla 4.
Clasificación del Índice de Calidad de la Roca (RQD).

Índice De Calidad R.Q.D (%)	Calidad	Clase	Valoración
100-90	Muy Buena	V	20
90-75	Buena	IV	17
75-50	Mediana	III	13
50-25	Mala	II	6
25-0	Muy Mala	I	3

Fuente: González de Vallejo 2004. Según Deere & Deere, (1988).

2.2.7. Mecanismos de Falla

El fallamiento es el producto de la combinación de diferentes factores tanto externos como internos que afectan la estabilidad, muchos de estos factores son los detonantes para la ocurrencia de deslizamientos en taludes y laderas.

- Factores condicionantes y detonantes en la estabilidad de taludes

Según González de Vallejo (2004), la estabilidad de los taludes dependerá de factores geométricos, geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, o de aquellos relacionados con el comportamiento mecánico del terreno como: la resistencia y deformabilidad.

Los factores detonantes son los que activan los deslizamientos en forma instantánea o en forma progresiva, como la actividad antrópica, lluvias intensas, sismos, sobrecarga del talud (Suarez, 2007).

Tabla 5.
Factores Condicionantes y Detonantes en la Estabilidad de Taludes

Factores Condicionantes	Factores Detonantes
Estratigrafía y litología.	Cargas dinámicas.
Estructura geológica.	Cambios en las condiciones hidrogeológicas
Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales.	Factores climáticos
Propiedades físicas, resistentes y deformacionales.	Variaciones en la geometría.
Tensiones naturales y estado tensodeformacional.	Reducción de parámetros resistentes

Fuente: González de Vallejo, (2004).

➤ Rotura en Rocas

Rotura planar: el deslizamiento se realiza en dirección del buzamiento de las discontinuidades que buzanan a favor del talud, el buzamiento es mayor que el ángulo de fricción.

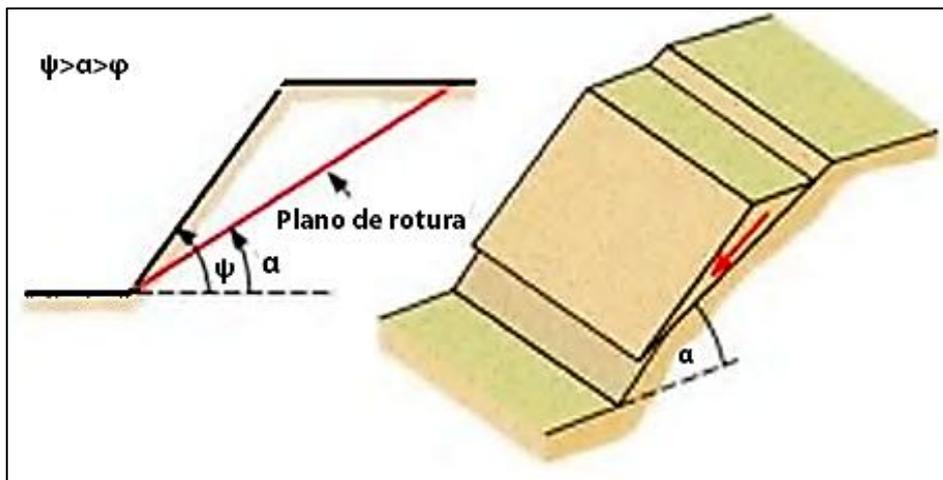


Figura 4. Diagrama de lo que es la Rotura Planar.
Fuente: González de Vallejo, (2004).

Rotura en cuña: la cuña se forma por dos planos de discontinuidades a favor de una línea de intersección, las discontinuidades deben estar aflorando en la superficie del talud para que ocurra el deslizamiento cumpliendo con las mismas condiciones que la rotura planar.

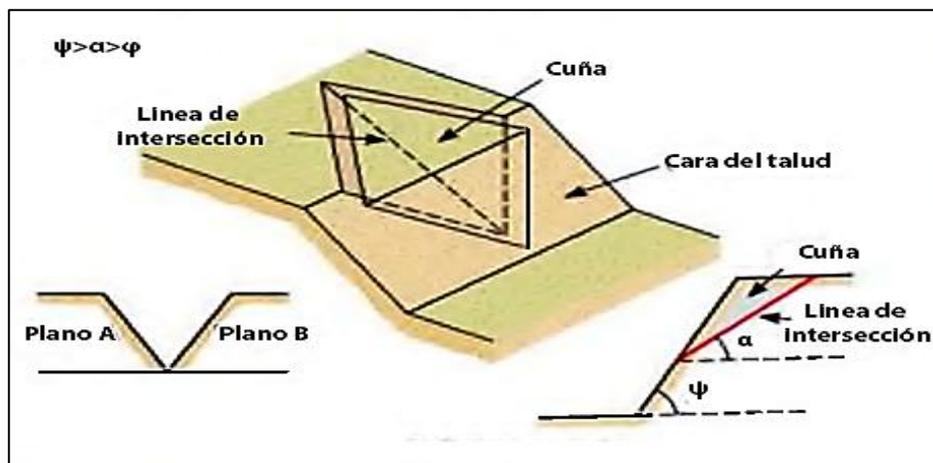


Figura 5. Diagrama de lo que es la Rotura en Cuña.
Fuente: González de Vallejo, (2004).

Rotura por pandeo (toppling): se produce cuando el buzamiento de los estratos es contrario a la inclinación del talud, la rotura se produce a favor de los planos de estratificación paralelos al talud, el buzamiento es mayor al ángulo de rozamiento interno.

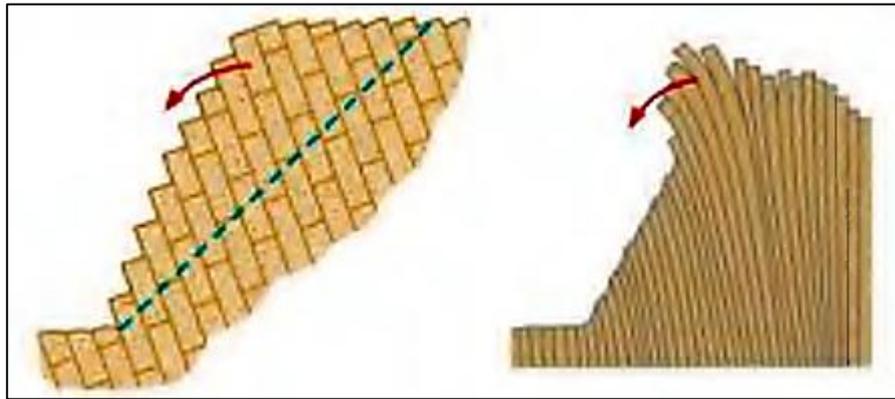


Figura 6. Diagrama de la Rotura por Pandeo o volcamiento.
Fuente: González de Vallejo, (2004).

La situación de los planos de rotura, en el caso de taludes sobre macizos rocosos competentes o resistentes, son determinados por las discontinuidades. En el caso de taludes sobre rocas poco competentes o blandas, la matriz rocosa es de gran importancia en el mecanismo y la generación de los planos de rotura.

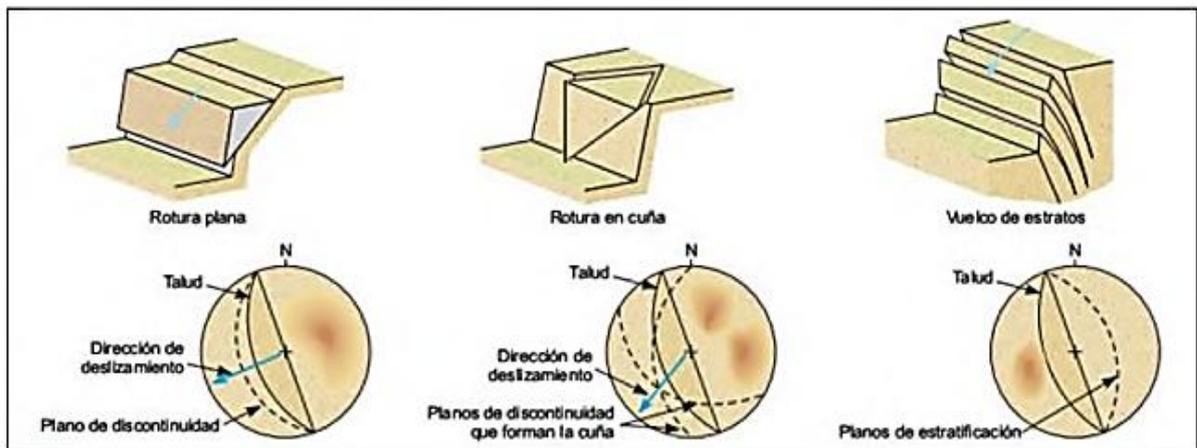


Figura 7. Rupturas en Roca y Representación Estereográfica.
Fuente: González de Vallejo, (2004).

2.2.8. Análisis de Estabilidad

El análisis se aplica a taludes que presentan problemas de inestabilidad, permitiendo determinar las medidas correctivas de estabilización para evitar

nuevos movimientos; hay diversos métodos de análisis de estabilidad que permiten calcular el factor de seguridad, la elección del método dependerá de las características geológicas y geomecánicas de suelos y rocas (González de Vallejo, 2004). La siguiente tabla muestra los principales métodos utilizados en el análisis de la estabilidad de taludes.

Tabla 6.
Métodos de Análisis de Estabilidad de Taludes.

Método	Superficie de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Fuente: Suárez, (2007).

➤ Factor de seguridad (F.S.)

Según Fellenius (1922) es la relación que existe entre la resistencia al corte real y los esfuerzos de corte actuantes (críticos).

$$F. S. = \frac{\text{Resistencia al corte disponible}}{\text{Esfuerzo al corte actuante}}$$

Haciendo el uso de las técnicas de equilibrio límite analizamos los movimientos de taludes y laderas, este método supone que tanto las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de una superficie de falla con un factor de seguridad igual 1.0 (Suarez, 2007).

2.2.9. Zonas Sísmicas del Perú

El Perú se divide en 4 zonas basándose en la distribución espacial de la sismicidad observada. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), 2019).



Figura 8. Zonificación sísmica del Perú.

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), (2019).

Tabla 7.

Valores de los Coeficientes Sísmicos acorde a la zonificación.

a: Zonas sísmicas del Perú	b: Coeficiente de ampliación topográfica	c: Categoría de perfil estratigráfico
1= 0.10 2= 0.25 3= 0.35 4= 0.45	1: Laderas y taludes con pendientes menores a 15°. 1.2: Laderas y taludes aislados con pendientes mayores a 15°. 1.4: Taludes y laderas con significativo menor grosor de cresta que de base, con pendientes mayores a 30°	0: S1 (Depósitos con niveles de más de 10m de arcillas/limos blandos con un índice de plasticidad alto (IP>40) y alto contenido de agua. S2 (Depósitos de suelos licuefactables, arcillas sensibles) 1: A (Roca u otra formación geológica similar a roca, incluyendo como máximo 5 m de material más débil en superficie) 1.25: B (Depósitos de arena muy densa, gravas, o arcilla muy dura, de decenas de metros de espesor caracterizado por un incremento de las propiedades mecánicas en profundidad). C (Depósitos de arena densa o media, grava o arcilla dura con un espesor de unas decenas hasta centenares de metros). E (Un perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial). 1.35: D (Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo, con o sin capas de débil cohesión, o de ligera a gran cohesión predominantemente).

Fuente: LoadCap, (2014).

2.3. DEFINICIONES DE TÉRMINOS BÁSICOS

Deslizamiento: desplazamiento de suelos, rocas o material desprendido debido a la influencia gravitacional, generando alteraciones en la configuración topográfica y ocasionando impactos ambientales significativos, así como daños en estructuras de construcción civil (Suarez, 2007).

Factor de seguridad: es la proporción entre las fuerzas que se oponen a la rotura y las fuerzas que intentan causar una fractura a lo largo de una superficie de falla (Suarez, 2007).

Falla: desplazamiento de un bloque en relación con otro a lo largo de un plano de falla originado por fuerzas tectónicas como la epirogenesis, orogenia y diastrofismo, lo que resulta en la formación de discontinuidades en las estructuras geológicas (Dávila, 2011).

Laderas: área de terreno que no es de superficie uniforme y que exhibe variaciones notables en su elevación o pendiente. Se considera una ladera cuando estos rasgos topográficos han evolucionado de manera natural (Suarez, 2007).

Macizos Rocosos: son segmentos de roca que han sido fragmentados por fracturas o discontinuidades. Desde una perspectiva mecánica, los macizos rocosos se caracterizan como medios anisótropos y discontinuos, ya que presentan variabilidad en sus propiedades en diferentes direcciones debido a la presencia de fracturas y otros tipos de discontinuidades (González de Vallejo, 2004).

Talud: una extensión de terreno que no es nivelada y que muestra variaciones notables en su inclinación o cambios significativos en su elevación se considera una ladera. Cuando estos rasgos topográficos se crean de manera deliberada, se denomina talud (Suarez, 2007).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

3.1.1. Geográfica

El área de estudio se ubica en la cordillera occidental de los andes, en el norte del Perú, en la zona 17S en los alrededores del distrito de Cajamarca cerca al centro poblado de Pariamarca, delimitada por los siguientes puntos geográficos tomados en el sistema Universal Transversal Mercator con Datum WGS-84 (Ver Anexos: Plano N° 01).

Tabla 8.
Delimitación de la zona de investigación.

Vértices	Coordenadas	
	Este	Norte
1	776400.00	9203425.00
2	777400.00	9203425.00
3	777400.00	9202085.00
4	776400.00	9202085.00

3.1.2. Política

La investigación se encuentra ubicada políticamente en el departamento de Cajamarca, provincia de Cajamarca, Distrito de Cajamarca.

Región : Cajamarca.
Provincia : Cajamarca.
Distrito : Cajamarca.
Centro Poblado : Pariamarca

3.1.3. Accesibilidad

Para acceder a la zona de estudio, Cerro Carambayo se utiliza la siguiente ruta; desde la ciudad de Cajamarca es yendo por la Av. La Paz con dirección hacia el centro poblado Pariamarca, encontrándose en el tramo del km 3 el Cerro Carambayo.

Tabla 9.
Accesibilidad a la zona de estudio.

PUNTO DE INICIO	PUNTO FINAL	TIPO DE CARRETERA	DISTANCIA	TIEMPO
Óvalo Musical	Cerro Carambayo	Carretera Asfaltada / Trocha Carrozable	6.00 Km	1 hora

3.2. PROCEDIMIENTOS

3.2.1. Tipo y Diseño de Investigación

La metodología se basará en el enfoque de Hernández et al. (2014), que abarca un diseño de investigación descriptiva. Esto implica transitar desde un análisis correlacional hasta llegar a un estudio básico no experimental. Por lo tanto, el proceso se inicia con la descripción de las características de los macizos rocosos y las condiciones a las que se someterán, como también la geomecánica de la zona y su estabilidad. Posteriormente, se establecerán correlaciones con las variables externas que impactan en la exposición de la roca, como la precipitación y actividad sísmica. Todo esto conduce a una fase final explicativa, donde se exploraron los posibles deslizamientos de laderas y taludes debido a la variabilidad de los parámetros mencionados anteriormente.

3.2.2. Población de Estudio

Los macizos rocosos de areniscas ferruginosas de las estaciones pertenecientes a un área de 1 km² de la Formación Chimú del cerro Carambayo, Pariamarca - Cajamarca.

3.2.3. Muestra

Estaciones de estudio, laderas, macizos rocosos de casa estación.

3.2.4. Unidad de Análisis

Probabilidad de rotura planar, Probabilidad de rotura en cuña, valor de RMR, valor de GSI, RQD y factor de seguridad.

3.3. DEFINICIÓN DE VARIABLES

Las variables independientes son litología, propiedades geomecánicas, propiedades geotécnicas y precipitación, y la variable dependiente es comportamiento geotécnico.

Tabla 10.
Definición de variables.

Variables Independientes	Variable Dependiente
Meteorización física	
Propiedades Geomecánicas	
Propiedades Geotécnicas	Comportamiento Geotécnico
Sismicidad	
Saturación	

3.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica de recolección de datos se encuentra definida en cuatro niveles o etapas, estas van interactuando entre sí durante la investigación, lo que quiere decir que no se cumple el orden que se propone, sino interactúan para dar un carácter dinámico de los datos recolectados, a continuación se detalla cada etapa o nivel.

3.4.1. Revisión y Consolidación de la Información

Se trata de la indagación de documentos académicos, textos, estudios e investigaciones sobre el estudio geotécnico de taludes en terrenos de Formaciones

de rocas areniscas. Al revisar esta información, se pudo desarrollar el marco teórico y obtener una visión más amplia y detallada de la investigación.

3.4.2. Etapa de Campo

Durante esta fase, se realiza la exploración y reconocimiento de la zona de estudio, junto con la caracterización detallada del macizo rocoso en términos de sus variables geoestructurales, morfogenéticas y geomecánicas. Además, se lleva a cabo la recopilación de datos para su posterior inclusión en el formato Geológico-Geotécnico que se observa en la Tabla 11.

3.4.3. Etapa de Análisis e Interpretación

Después de recolectar los datos en el campo, se procede a analizarlos en el escritorio con un proceso de filtrado para obtener la información más precisa posible. Esta información se somete a un análisis basado en los criterios de rotura de Hoek y Brown, utilizando el software RocData. Además, se modelan las secciones geológicas en el software Slide para calcular los Factores de Seguridad dinámicos y estáticos. Este proceso define el análisis geotécnico del macizo rocoso mediante métodos de equilibrio límite.

3.4.4. Elaboración de la Tesis de Investigación

Los resultados obtenidos de las tres etapas previas y su análisis han culminado en la elaboración de una tesis de investigación. En esta tesis se presenta el modelo geológico y geotécnico aplicado al análisis del macizo rocoso desde una perspectiva geotécnica.

3.5. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

Para la investigación se utilizaron los siguientes instrumentos y equipos:

- **Brújula Brunton:** Sirve para tomar datos de Dip y Dip Direction de discontinuidades.

- **Cámara fotográfica:** Dispositivo utilizado para la captura de fotografías que servirán como evidencia.
- **Flexómetro:** Instrumento que se utilizará para la medición de espesores de las discontinuidades y medición de RQD.
- **GPS de navegación:** Dispositivo para registrar coordenadas UTM en el sistema UTM WGS 1984 Zona 17 Sur, facilitando la localización de contactos y puntos críticos.
- **Imagen satelital:** es una herramienta importante en el apoyo de proyectos geotécnicos, son útiles para la preparación de mapas de afloramientos de rocas como también cobertura de vegetación.
- **Lápiz de dureza:** Utilizado para el reconocimiento de la dureza de las muestras.
- **Laptop:** Sirve para el procesamiento de la información y elaboración de la tesis.
- **Libreta de campo:** Instrumento utilizado para la toma y recolección de datos de campo.
- **Lupa 10X:** Herramienta empleada para examinar las texturas e identificar minerales en las muestras.
- **Picota:** Instrumento de percusión utilizado para evaluar la resistencia de la roca y extraer muestras en salidas de campo.
- **Plano geológico-estructural:** Sirve para ubicar en qué tipo de unidades se encuentran los deslizamientos.
- **Plano topográfico:** Sirve para realizar el cartografiado de unidades estratigráficas.
- **Protactor:** Sirve para graficar rumbo y buzamiento de la estratificación de las unidades.

Como instrumento de recolección de datos se utilizó el siguiente formato geológico – geotécnico.

Tabla 11.
Formato Geológico - Geotécnico.

REGISTRO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO				PROYECTO :	UBICACIÓN :	ESTACIÓN :	SISTEMA	FECHA	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA													
DIS. Nro.	DATA GPS			MACIZO ROCOSO				PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES CARTOGRAFIADAS														
	ESTE	NORTE	COTA	LITOLÓG./FORMAC.	METEORIZ	GRADO DE FRACT.	RQD	GSI	TIPOS	DIRECCIÓN		RESI ST.	ESP ACI	PERSIST (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	TIPO	RELLENO	DUREZA	ALTERAC. METEORIC.	AGUA	CALIDAD DE INFORM.
					1=Fresoo 2=Leve 3=Mod. 4=Alta	1=Alto 2=Medio		1=Bloq. Reg 2=Bloq. Irreg 3=Bloque y capas	E=Estratif. D=Diadclasa Fn= Falla Nd Fi= Falla inv Fd= Falla dir	ORIENTACIÓN			1=>2 2=2 3=0,6	1=<1 2= 1 - 3 3= 3- 10	1=Nada 2=<0,1 3=0,1 - 1,0	1=Muy Rug. 2=Rugosa 3=Lig. Rug	1=Arcilloso 2=Qz/Silic. 3=Calcita	1=Ninguna 2=Duro<5mm 3=Duro>5mm	1=Inalterada 2=Lig. Alt. 3=Mod. Alt.	1=Seco 2=Humedo 3=Mojado	1=Lec. Real 2=Lec. Apar. 3=Lec. Proy.	
					5=Completa 6=Suelo	3=Bajo	λ	4=Fract. Int	mf=Microfal T=Talud C=Contacto	DIP	DD	(Mpa)	4=0,24 5=<0	= 10 - 20 5=>20	4= 1,0 - 5,0 5 =>5	4=Ond. - Lisa 5= Suave - Pulida	4=Oxidos 5=Roca Tritur 6=Bx 7=Panizo 8=Veta	4=Suave<5mm 5=Suave>5mm	4=Muy Alt. 5=Descomp.	4=Goteo 5=Flujo 6=Presion		
1																						
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						
11																						
12																						
13																						
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						
24																						
25																						
26																						
27																						
28																						
29																						
30																						
31																						
32																						

Fuente: Rodríguez, (2016).

3.6. GEOLOGÍA LOCAL

Las unidades litológicas identificadas en el área de investigación se describen a continuación:

3.6.1. Grupo Goyllarisquizga

➤ Formación Chimú

En la zona de investigación, se encuentra dispuesta la Formación Chimú en estratos los cuales se encuentran ubicados en la zona noreste y suroeste del Cerro Carambayo, en la cima del mismo la formación también presenta afloramientos del macizo rocoso, el cual en algunas zonas se encuentra recubierto por material cuaternario y vegetación, en las zonas más bajas se encuentran recubiertas por depósitos aluviales. Esta formación geológica es de particular interés debido a su composición y ubicación estratégica para estudios geomecánicos y geológicos.

La Formación Chimú en el área de investigación se caracteriza principalmente por la presencia de rocas areniscas ferruginosas con una composición de grano medio a fino. Se observa la oxidación de algunos minerales con contenido de hierro en la formación, lo cual se manifiesta a través de coloraciones rojizas en ciertas áreas. Estas rocas muestran una diversidad de propiedades mecánicas y estructurales, lo que las hace relevantes para el análisis de la estabilidad de las laderas y la evaluación de riesgos geológicos en la región.

Por otro lado, se ha identificado la presencia de arenas y arcillas en la Formación Chimú. Las arenas son los componentes más abundantes y se encuentran principalmente rellenando fracturas en las rocas presentes en las laderas del Cerro.

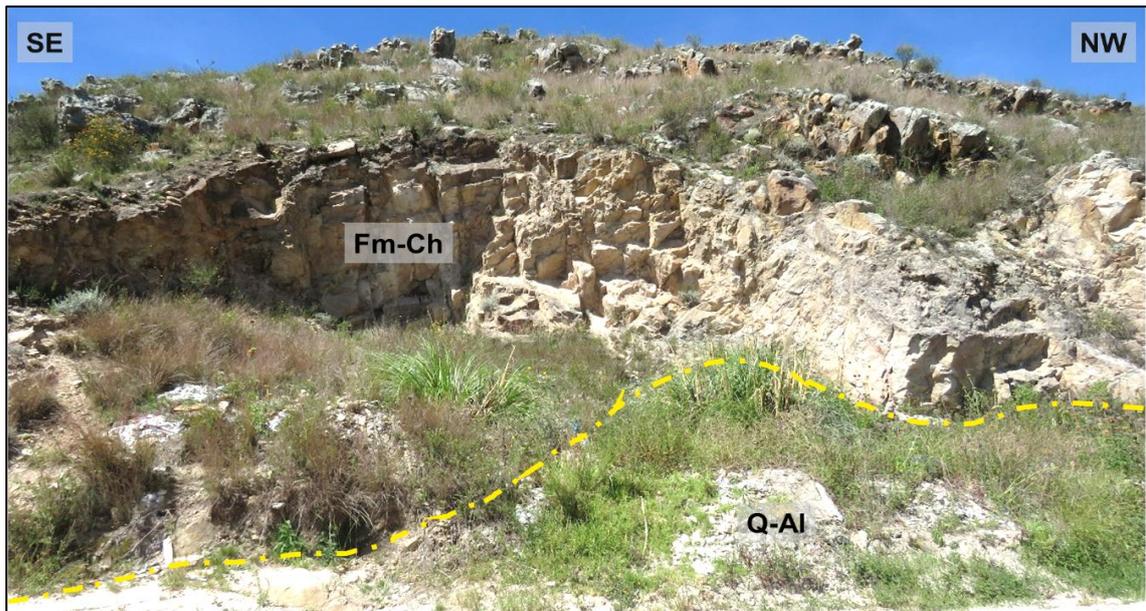


Fotografía 1. Macizo rocoso de la Fm. Chimú. Carretera a Paríamarca.

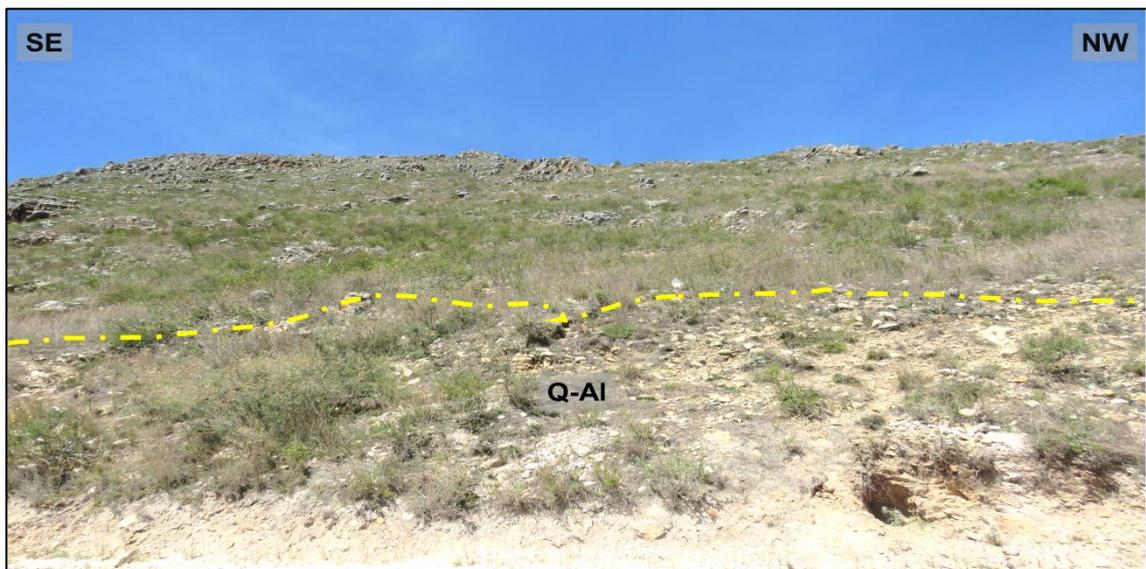
3.6.2. Cuaternario

➤ Depósitos Aluviales

Se encuentra ubicados los depósitos en las zonas bajas del Cerro Carambayo, encontrándose a lo largo de la carretera de la Av. La Paz, el cual se encuentra al costado del Cerro Carambayo estos depósitos se originaron a partir de material con poco movimiento, el cual se acumuló debido a las precipitaciones y la acción de la gravedad. Están compuestos por gravas y bolonería de forma subangulosa a angulosa, poco compactadas, con una matriz predominantemente arenosa y un bajo contenido de arcilla, así como clastos de tamaño variado.



Fotografía 2. Depósitos Aluviales que se encuentran al costado de la carretera.



Fotografía 3. Depósitos Aluviales se logran apreciar al costado de la carretera.

3.7. GEOMORFOLOGÍA

3.7.1. Unidades Morfogenéticas

En la zona de investigación se identificaron diferentes unidades morfogenéticas, esto se realizó tomando en cuenta la altura y pendiente de las unidades. Por lo que se recurrió a la clasificación de Tapia y López (2001), y la modificación de Rodríguez (2016). Se determinaron las siguientes unidades, las cuales se pueden apreciar en Anexos: Plano N°03:

Tabla 12.

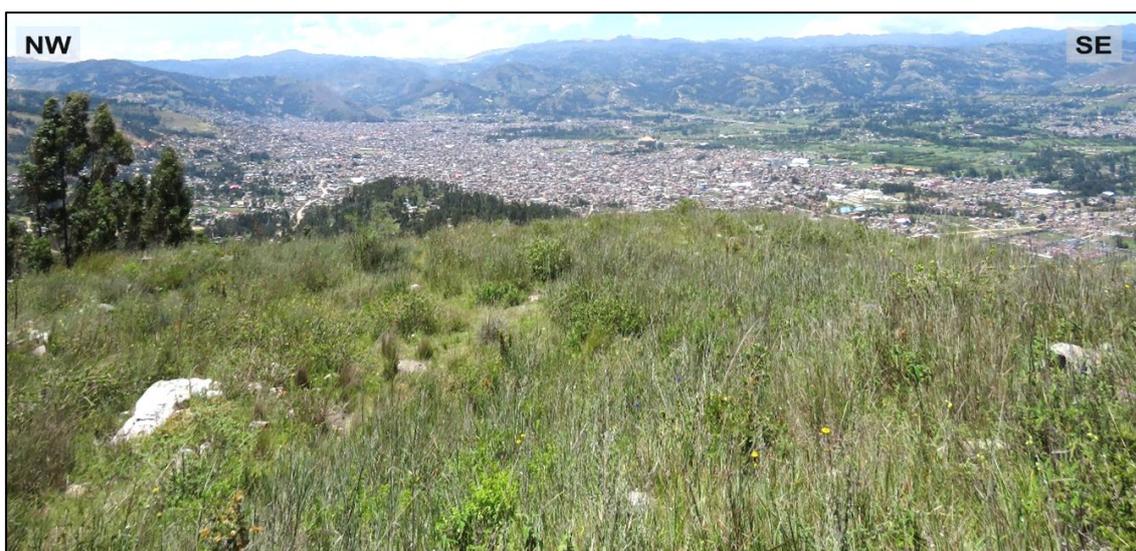
Unidades morfogénicas según Rodríguez (2016).

Pendiente	Descripción
0° - 8°	Planicies
8° - 20°	Lomadas
20° - 50°	Laderas
50° - 90°	Escarpas

Fuente: Editado de Rodríguez, (2016).

Planicies (0° - 8°)

Estas áreas se caracterizan por tener una pendiente muy baja, generalmente entre 0° y 8°. Son terrenos relativamente llanos y extensos, donde predominan los procesos de sedimentación y deposición. Estas planicies se encuentran ubicadas en la zona superior del Cerro Carambayo específicamente en las partes altas ubicadas hacia el sur oeste del mismo.



Fotografía 4. Planicie ubicada en la parte superior del cerro Carambayo.

Lomadas (8° - 20°)

Las lomadas corresponden a áreas con una pendiente moderada, generalmente entre 8° y 20°. Se caracterizan por presentar ondulaciones suaves en el terreno, con pequeñas elevaciones y depresiones. Se encuentran ubicadas a en la superior del Cerro Carambayo, pero su presencia aumenta hacia el noroeste del Cerro Carambayo.



Fotografía 5. Lomada de 12°, ubicado al SW del cerro Carambayo.

Laderas (20° - 50°)

Las laderas se encuentran en áreas con una pendiente moderadamente alta, típicamente entre 20° y 50°. Son zonas de transición entre las lomadas y las escarpas, donde los procesos erosivos y de transporte de materiales son más activos. Las laderas se ubican en las partes bajas del Cerro Carambayo en su totalidad, rodeando el mismo, a lo largo de la carretera de la Av. La paz y hacia el Sur, rodeando hacia llegar al oeste del mismo.



Fotografía 6. Ladera en el acceso a Paríamarca. Pendiente de 32°.

3.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

3.8.1. Falla normal inferida

Hacia la zona sur del Cerro Carambayo, cerca al centro poblado de Paríamarca se infiere una posible falla normal, según lo que se menciona en la carta geológica del INGEMMET 15g. Esta falla tiene una dirección Oeste – Este, se infiere que los esfuerzos que ocasionan esta falla, afecta a la roca arenisca que pertenece al Cerro Carambayo, haciendo que la roca presente zonas de debilidad, esta falla se observa en el Anexo: Plano Geológico.

3.8.2. Diaclasamiento

En las estaciones de estudio las cuales se encuentran al NE y al SW del Cerro Carambayo, se observa que los afloramientos rocosos de la Formación Chimú exhiben una serie de familias de diaclasas, las cuales se formaron como resultado de la fatiga generada por los esfuerzos tectónicos acumulados a lo largo del tiempo, se relaciona con la falla inferida que se encuentra cercana al Cerro Carambayo descrita anteriormente. Estas estructuras geológicas, se encuentran predominantemente en la cara de las laderas, específicamente en las estaciones que fueron estudiadas, donde son claramente visibles y accesibles para su estudio.



Fotografía 7. Se observa diaclasamiento (líneas amarillas). Estación N°01.

3.9. PRECIPITACIÓN

El análisis de la precipitación se realizó a partir de datos mensuales registrados entre los años 2019 y 2023 los cuales se obtuvieron del SENAMHI, de la estación Aylambo siendo la más cercana a la zona de estudio. Expresados en milímetros por hora (mm/h). Los resultados permiten identificar patrones estacionales, variaciones interanuales y eventos extremos que influyen en el comportamiento hídrico de la zona de estudio. Durante el periodo analizado, se observa una marcada variabilidad en la intensidad promedio anual de las precipitaciones. Entre 2019 y 2021 se registra una ligera disminución del promedio anual, pasando de 1.23 mm/h en 2019 a 0.84 mm/h en 2021. El año 2022 representa el periodo más seco, con un promedio de apenas 0.28 mm/h, mientras que el año 2023 destaca por presentar un incremento notable en la precipitación, alcanzando un promedio anual de 2.00 mm/h. Este comportamiento sugiere la posible influencia de fenómenos climáticos como El Niño o La Niña.

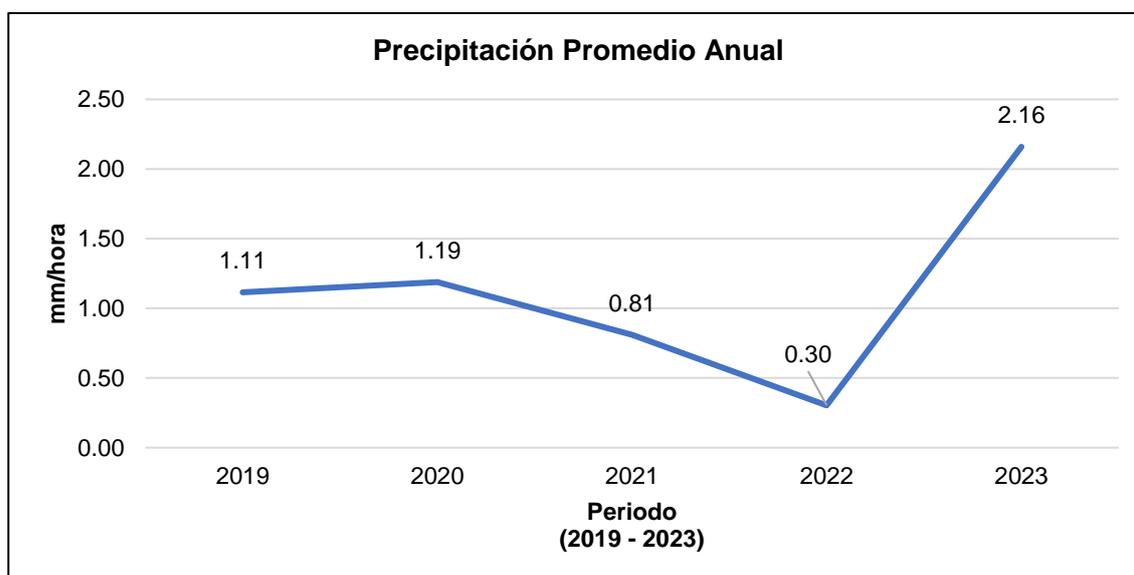


Figura 9. Precipitación anual promedio.
Fuente: SENAMHI, (2025).

El análisis mensual agrupado para los cinco años permite identificar claramente la estacionalidad de las lluvias. Los meses de mayor precipitación corresponden al verano y otoño, con picos en abril (2.32 mm/h), diciembre (1.81 mm/h), enero (1.71 mm/h) y febrero (1.67 mm/h). En contraste, los meses más secos son junio, julio y

agosto, con valores promedio por debajo de 0.30 mm/h, representando así la estación seca de la región.

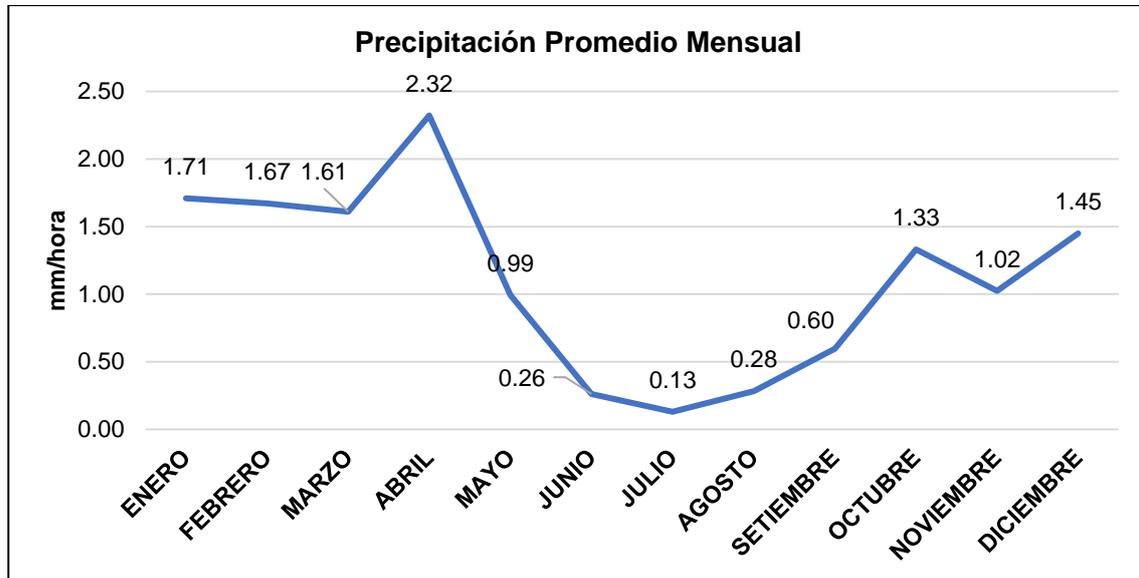


Figura 10. Precipitación mensual promedio.
Fuente: SENAMHI, (2025).

La distribución mensual y anual de la precipitación tiene implicancias directas en la evaluación geotécnica e hidrogeológica de la zona. La estación lluviosa (diciembre–abril) representa un periodo de mayor riesgo de saturación de laderas y suelos, mientras que la estación seca (junio–agosto) ofrece condiciones más estables para trabajos de campo y monitoreos estructurales. Asimismo, la alta variabilidad entre años resalta la necesidad de considerar ventanas climáticas representativas en los análisis de estabilidad, infiltración y recarga hídrica.

3.10. SISMICIDAD

Para realizar el análisis pseudoestático de estabilidad de taludes en la zona de estudio (Cerro Carambayo, distrito de Paríamarca – Cajamarca), fue necesario establecer los coeficientes sísmicos horizontal y vertical conforme a los lineamientos de la Norma Técnica Peruana E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). De acuerdo con la zonificación sísmica del país establecida en el Anexo A de la norma E.030, el departamento de Cajamarca se ubica en la Zona Sísmica 3, lo que corresponde a un coeficiente

sísmico zonal $Z=0.40Z$ (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), 2019).

En cuanto al tipo de suelo, la zona evaluada está compuesta por areniscas levemente meteorizadas, por lo cual se ha clasificado como tipo de suelo S2 (roca fracturada o meteorizada). Según la Tabla 4 de la norma, esto implica un factor de sitio $S=1.2$. Respecto al uso, al tratarse de una zona rural sin infraestructura crítica ni edificaciones de importancia aguas abajo, se consideró un factor de uso $U=1$. Finalmente, dado que el análisis corresponde a taludes naturales o intervenidos y no a edificaciones estructurales, se adoptó un factor de comportamiento sísmico $R=1.0$, siguiendo criterios técnicos establecidos para análisis geotécnicos en laderas (Hoek et al., 2000). Con estos parámetros, el coeficiente sísmico horizontal se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$k_h = \frac{Z \times S \times U}{R} = \frac{0.40 \times 1.2 \times 1.0}{1.0} = 0.48$$

Asimismo, el coeficiente sísmico vertical se asumió como el 50 % del horizontal, como lo permite la E.030 para efectos de modelamiento pseudoestático:

$$k_v = 0.5 \times k_h = 0.24$$

Por tanto, los valores utilizados en el análisis de estabilidad sísmica fueron:

- Coeficiente sísmico horizontal: $k_h=0.48$.
- Coeficiente sísmico vertical: $k_v=0.24$.

Estos valores fueron posteriormente ingresados en el software Slide para evaluar el factor de seguridad bajo condiciones sísmicas.

3.11. ANÁLISIS GEOTÉCNICO

A continuación, se describen las características del análisis geotécnico de las cinco estaciones ubicadas en zonas relevantes para la estabilidad de laderas y taludes. Empezando el análisis se toma en cuenta la meteorización a consideración según

Duque – Escobar, 1998. EL cual menciona que para todas las estaciones la caracterización de la meteorización se considera como física, lo que nos indica que es una meteorización leve, debido que la resistencia de la roca a comparación de una roca fresca, disminuye su resistencia al momento de romperse, por otro lado, se observa la presencia de oxidación de minerales de hierro, los cuales rellenan las fracturas de la roca misma.

3.11.1. Estación N°01

➤ Índice de Resistencia Geológica (GSI)

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70			
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60			
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40		
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

Figura 11. Valor de Índice de Resistencia Geológica.
Fuente: Gonzáles de Vallejo., (2004).

GSI=59.00

➤ Clasificación del Macizo Rocosó (RMR)

- Corrección de Valoración de Resistencia de la Roca Sana

Tabla 13.
Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.

CLASE	RESIST.	RESIST. UNIAxIAL Mpa	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Mpa	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA EN EL CAMPO
R4	Resistente	80	3	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.

Fuente: Brown, (1981).

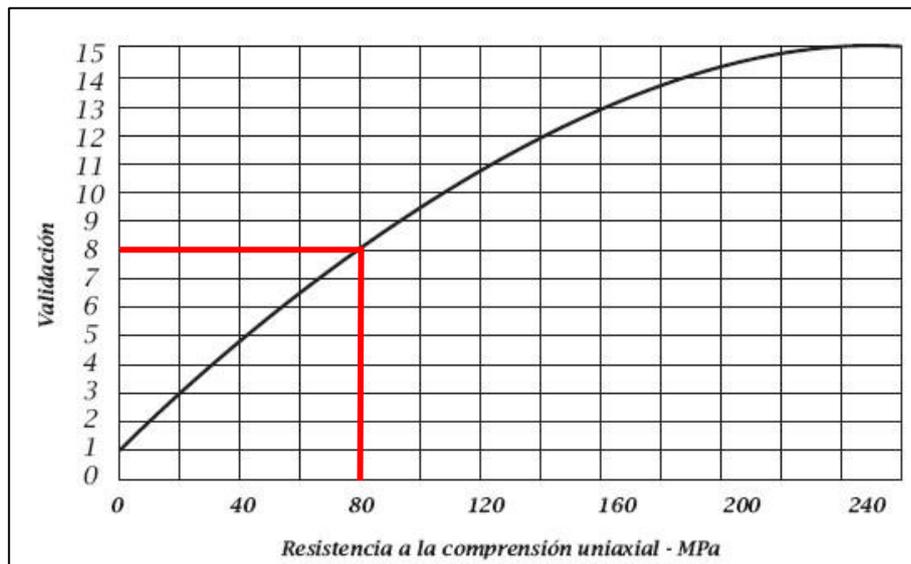


Figura 12. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.

- **Valoración: 8.**

- Corrección de Valoración de RQD

Longitud : 2.00 m

Nº de discontinuidades : 20

Lambda (λ) : 15.00

Cálculo del valor de RQD : $RQD=100 \cdot e^{(-0.1\lambda)} \cdot (0.1\lambda+1)$

RQD=73.57

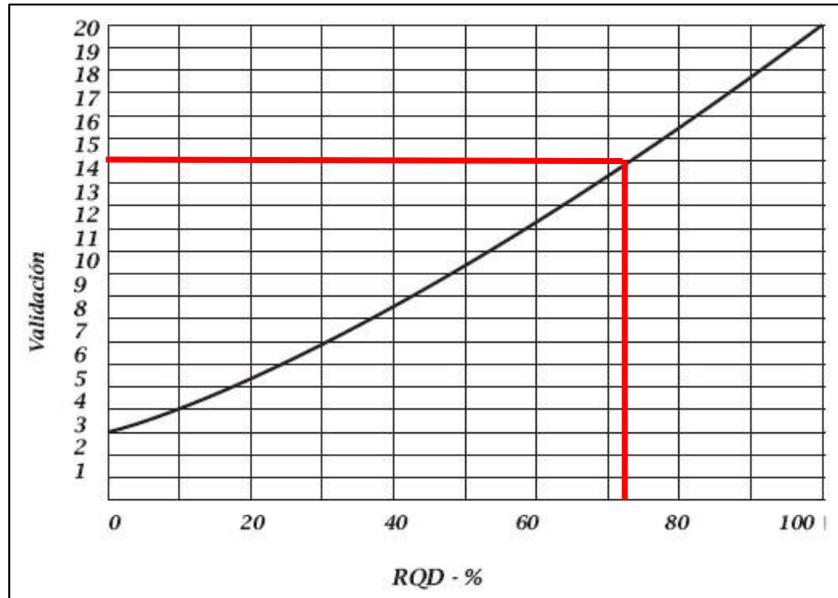


Figura 13. Abaco de corrección de valor de RQD.

- **Valoración: 15.**

- Valoración de Separación de Discontinuidades

- Separación de Discontinuidades : Promedio de 0.2 a 0.6 m.
Valoración : 9

- Valoración de Estado de Discontinuidades

- Persistencia : 1 a 3 m.
Valoración : 5
- Abertura : 0.1 a 1.0 mm.
Valoración : 2
- Rugosidad : Ligeramente Rugosa
Valoración : 3
- Relleno : Sílice – duro de 5 mm aprox.
Valoración : 3
- Alteración Meteórica : Moderadamente Alterada.
Valoración : 3

- Valoración de Presencia de Agua

- Presencia de Agua : Húmedo a mojado.
Valoración : 9

Cálculo de valoración = $8+15+9+5+2+3+3+3+9 = 57$

Tabla 14.
Valor obtenido de RMR y clasificación.

CLASE	VALOR RMR	CALIDAD DE ROCA
III	57	Regular

➤ RocData y Dips

Análisis y valores de las características físicas del macizo rocoso obtenidas del software de RocData:

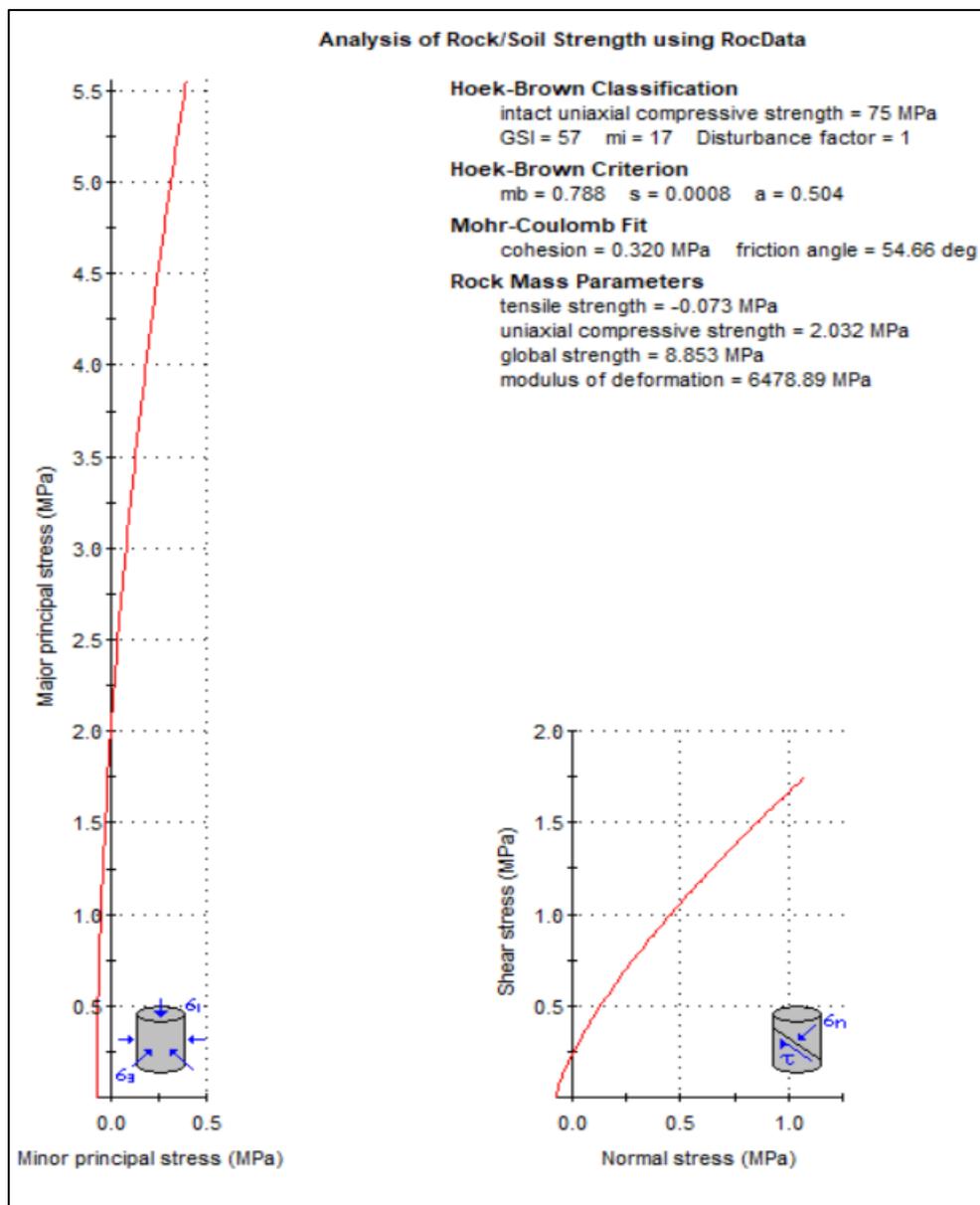


Figura 14. Análisis de Roca utilizando RocData.

Se encontraron en campo dos familias de diaclasas y la estratificación las cuales se clasificaron como D1, D2 y E, respectivamente.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 15.
Probabilidad de falla planar y cuña.

PROBABILIDAD DE FALLA	ESTACIÓN
	1
PLANAR	94.00%
CUÑA	43.00%

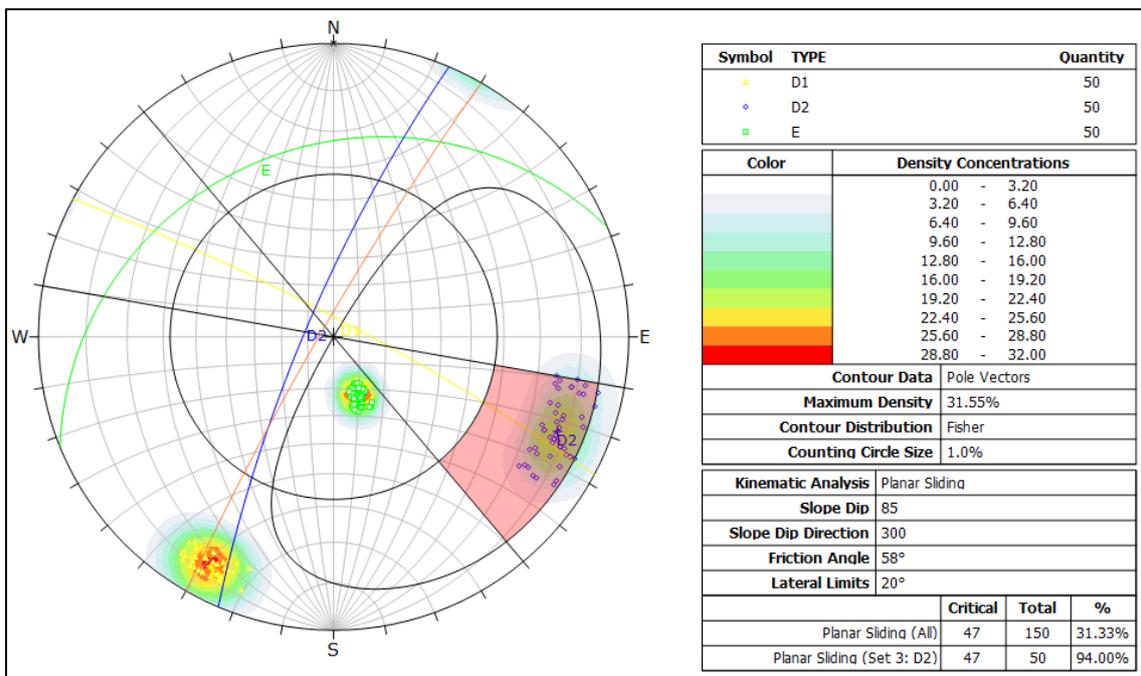


Figura 15. Análisis de posibilidad de rotura planar, Software Dips.

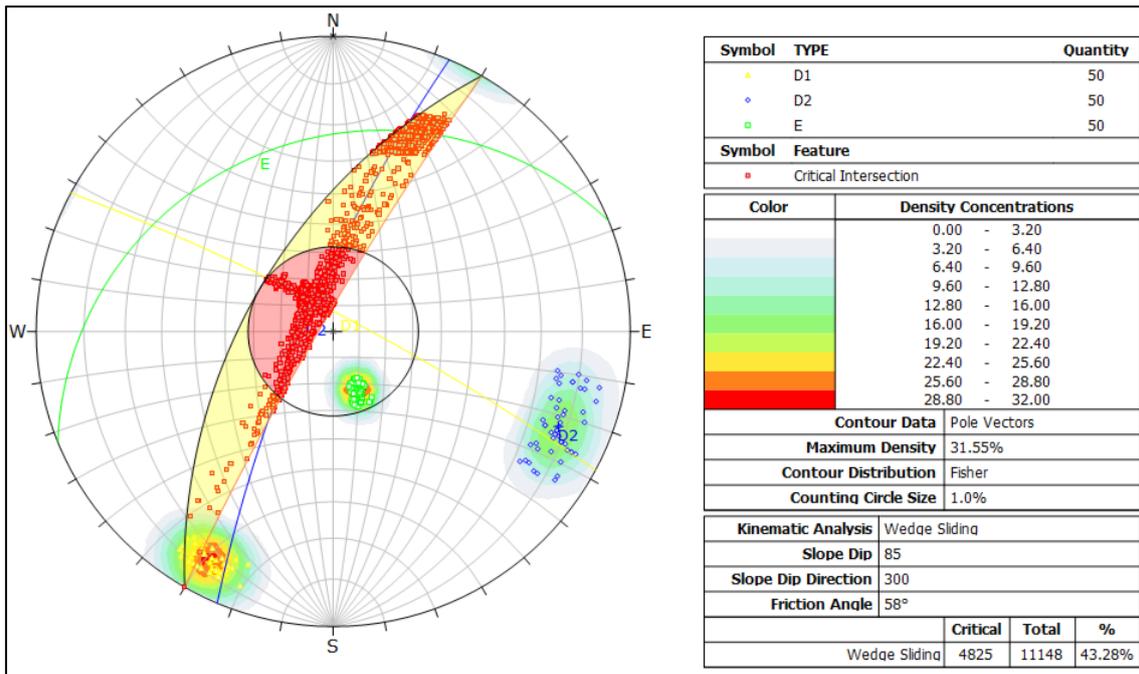


Figura 16. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips.

➤ Análisis de Estabilidad

Con los datos obtenidos en campo y del software RocData se dispuso el análisis en el software Slide para obtener su valor de Factor de Seguridad. Este se realizó en tres estados: el primero natural, el segundo con saturación al 100%, el tercero con saturación al 100 % y sismicidad.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 16.
Factor de Seguridad.

FACTOR DE SEGURIDAD	ESTACIÓN
	1
NATURAL	1.942
SATURACIÓN 100 %	1.213
SATURACIÓN 100 % + SISMICIDAD	0.819

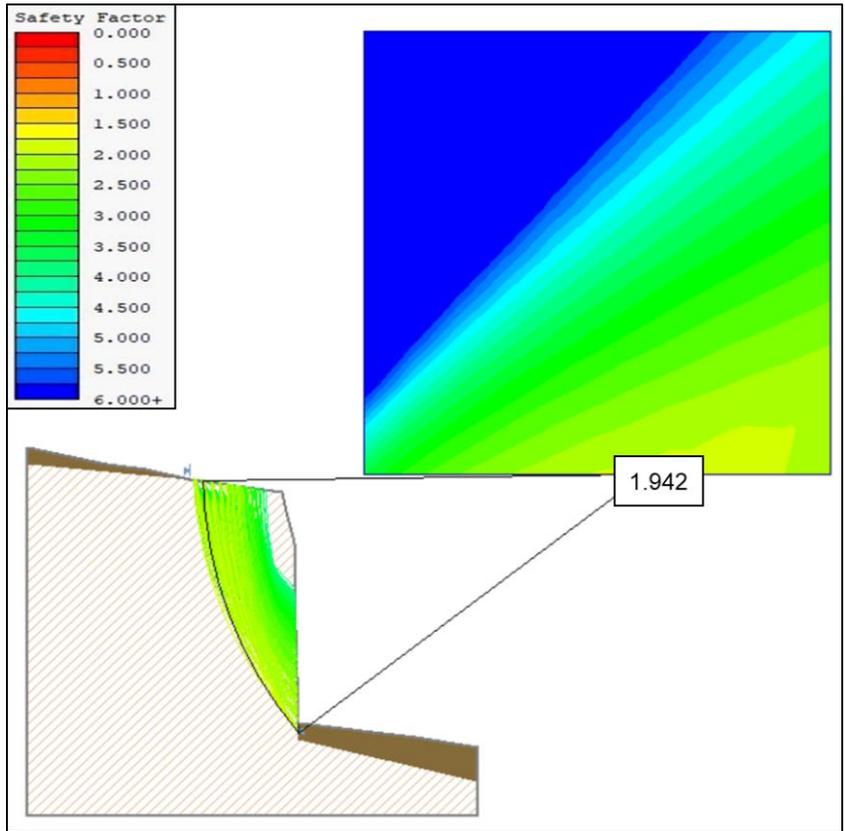


Figura 17. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.

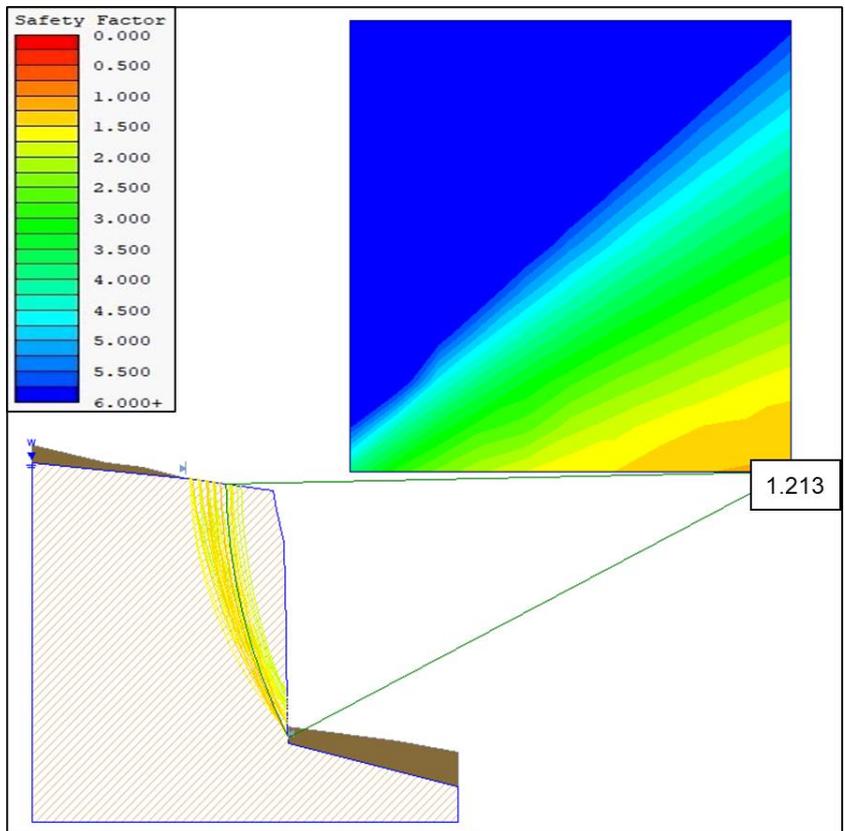


Figura 18. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.

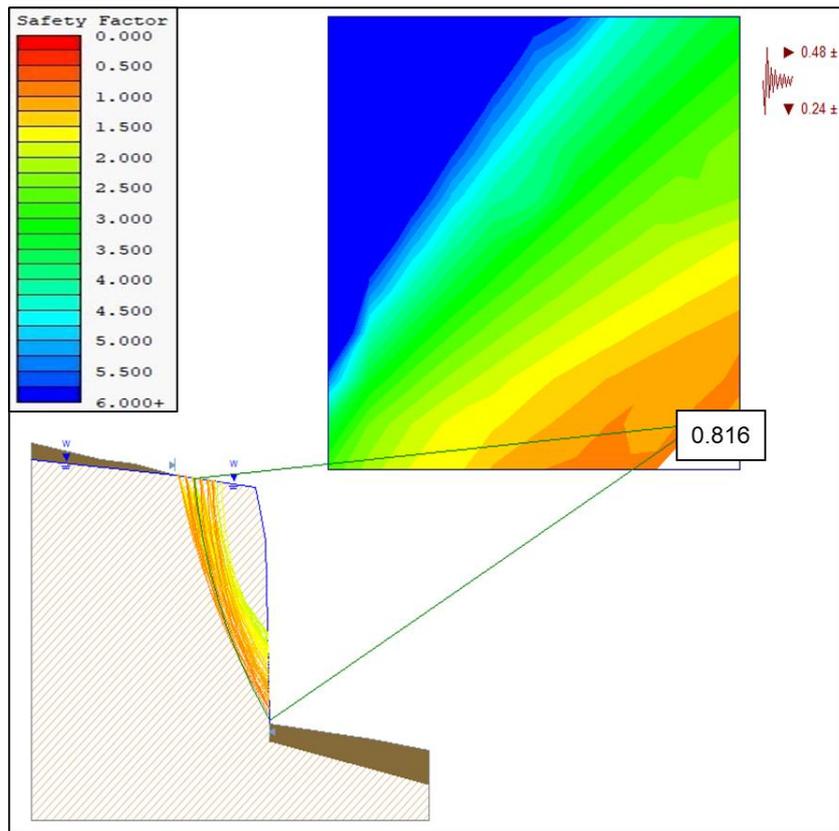


Figura 19. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.

3.11.2. Estación N°02

- Índice de Resistencia Geológica (GSI)

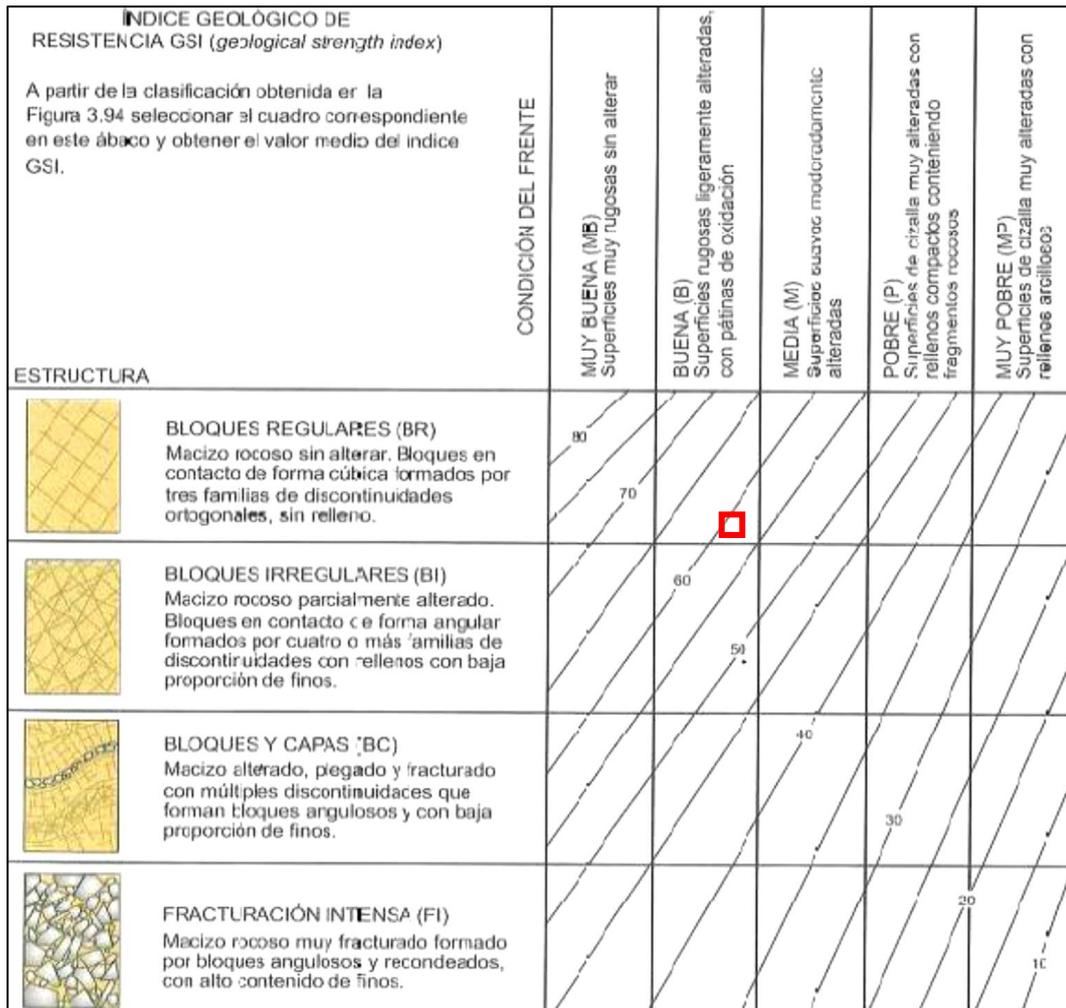


Figura 20. Valor de Índice de Resistencia Geológica.
Fuente: Gonzáles de Vallejo., (2004).

GSI=59.00

➤ Clasificación del Macizo Rocos (RMR)

- Corrección de Valoración de Resistencia de la Roca Sana

Tabla 17.
 Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.

CLASE	RESIST.	RESIST. UNIAxIAL Mpa	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Mpa	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA EN EL CAMPO
R4	Resistente	80	3	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.

Fuente: Brown, (1981).

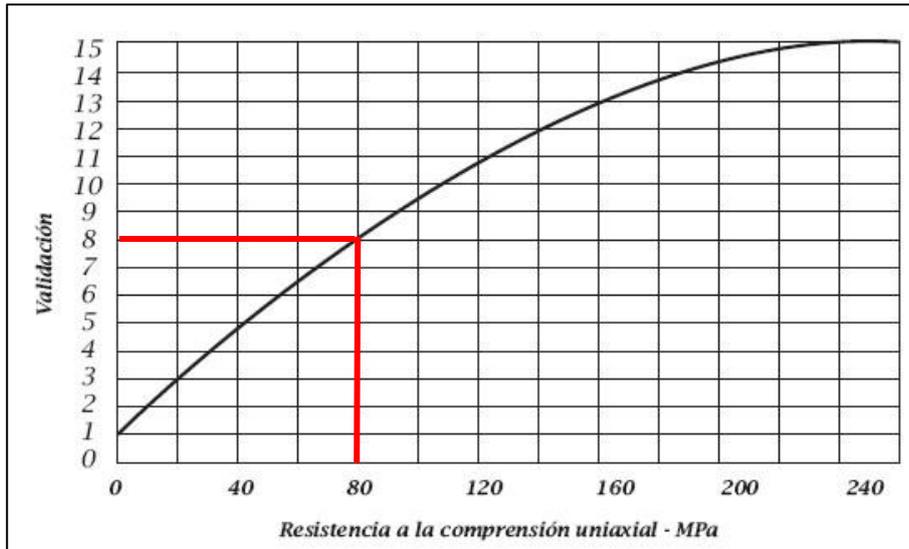


Figura 21. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.

- **Valoración: 8.**

- Corrección de Valoración de RQD

Longitud : 3.00 m

Nº de discontinuidades : 30

Lambda (λ) : 10

Cálculo del valor de RQD : $RQD=100 \cdot e^{(-0.1\lambda)} \cdot (0.1\lambda+1)$

RQD=73.57

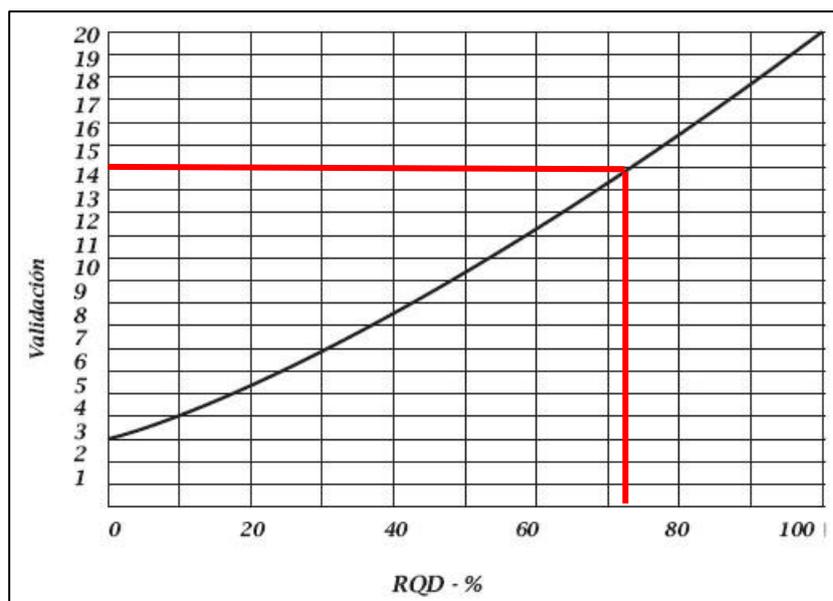


Figura 22. Abaco de corrección de valor de RQD.

- **Valoración: 15.**

- Valoración de Separación de Discontinuidades
 - Separación de Discontinuidades : Promedio de 0.2 a 0.6 m.
 - Valoración : 9
- Valoración de Estado de Discontinuidades
 - Persistencia : 1 a 3 m.
 - Valoración : 5
 - Abertura : 0.1 a 1.0 mm.
 - Valoración : 2
 - Rugosidad : Ligeramente Rugosa
 - Valoración : 3
 - Relleno : Sílice – duro de 5 mm aprox.
 - Valoración : 3
 - Alteración Meteórica : Moderadamente Alterada.
 - Valoración : 3
- Valoración de Presencia de Agua
 - Presencia de Agua : Húmedo a mojado.
 - Valoración : 9

Cálculo de valoración = 8+15+9+5+2+3+3+3+9 = 57 → 57

Tabla 18.
Valor obtenido de RMR y clasificación.

CLASE	VALOR RMR	CALIDAD DE ROCA
III	57	Regular

➤ RocData y Dips

Análisis y valores de las características físicas del macizo rocoso obtenidas del software de RocData:

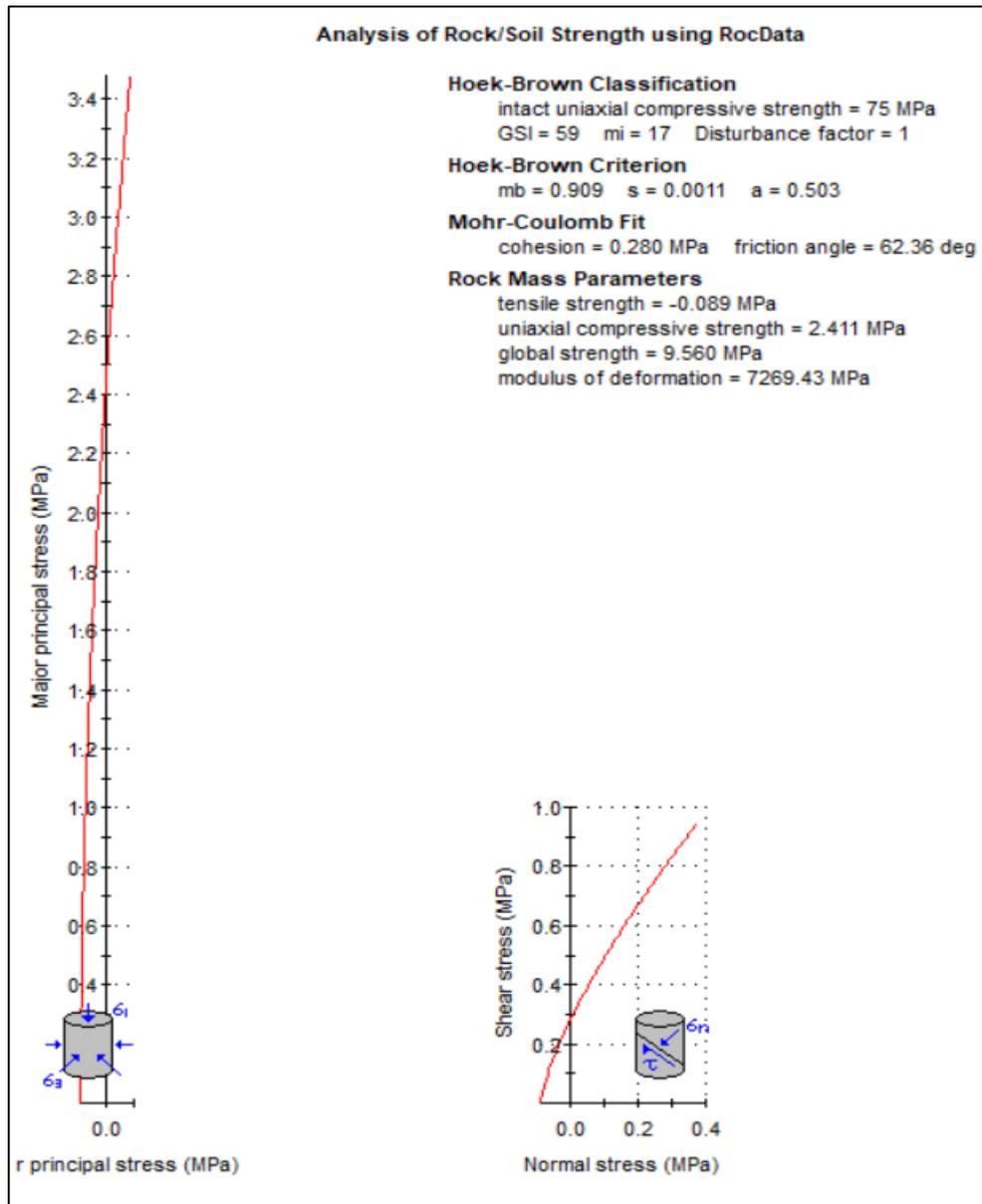


Figura 23. Análisis de Roca utilizando RocData.

Se encontraron en campo dos familias de diaclasas y la estratificación las cuales se clasificaron como D1, D2 y E, respectivamente.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 19.
 Probabilidad de falla planar y cuña.

PROBABILIDAD DE FALLA	ESTACIÓN
	2
PLANAR	4.00%
CUÑA	23.43%

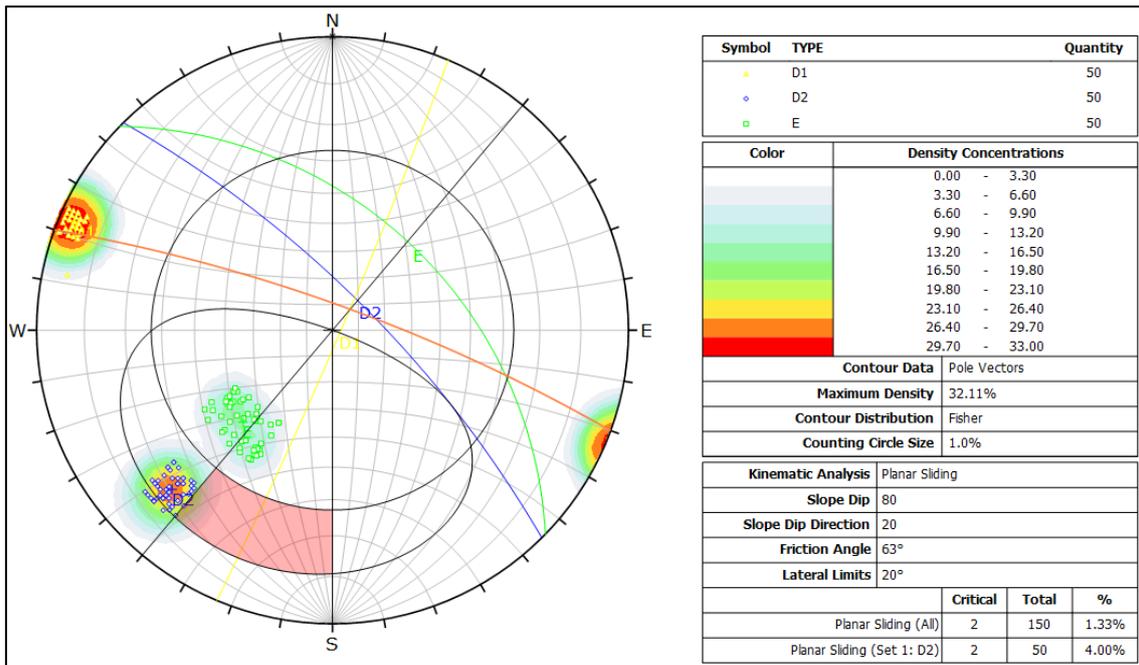


Figura 24. Análisis de posibilidad de rotura planar, Software Dips.

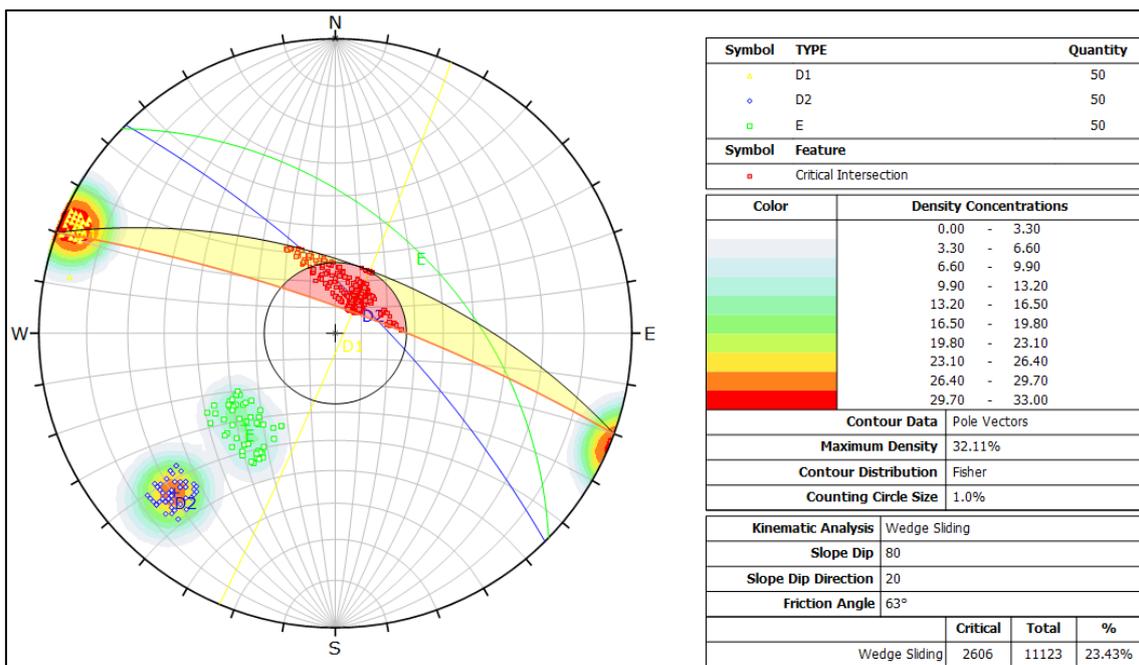


Figura 25. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips

➤ Análisis de Estabilidad

Con los datos obtenidos en campo y del software RocData se dispuso el análisis en el software Slide para obtener su valor de Factor de Seguridad. Este se realizó en tres estados: el primero natural, el segundo con saturación al 100%, el tercero con saturación al 100 % y sismicidad.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 20.
Factor de Seguridad.

FACTOR DE SEGURIDAD	ESTACIÓN
NATURAL	1.885
SATURACIÓN 100 %	1.333
SATURACIÓN 100 % + SISMICIDAD	0.847

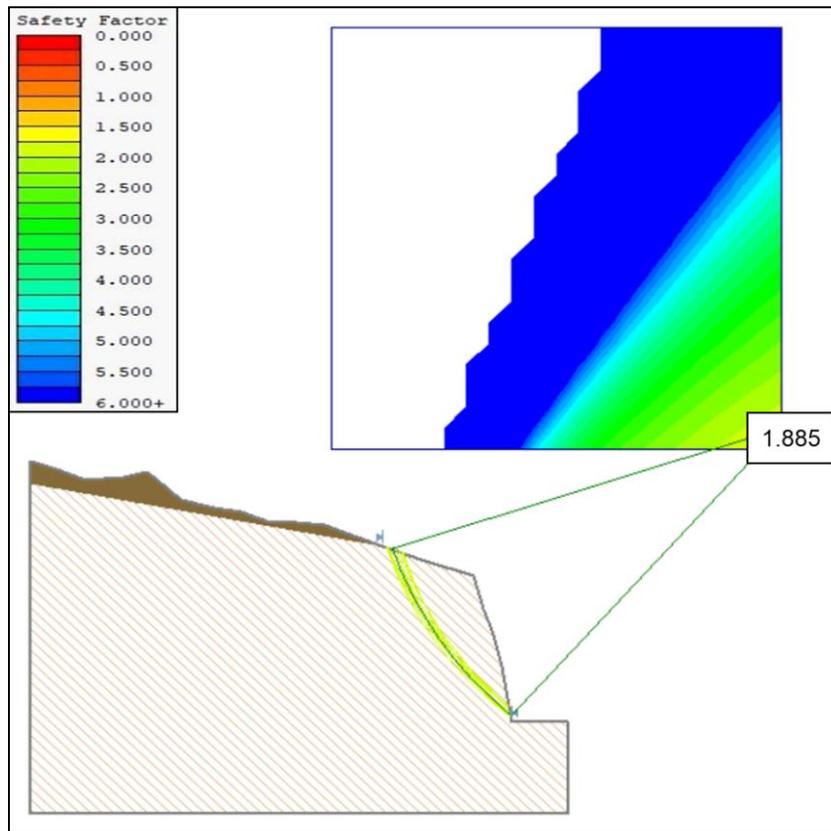


Figura 26. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.

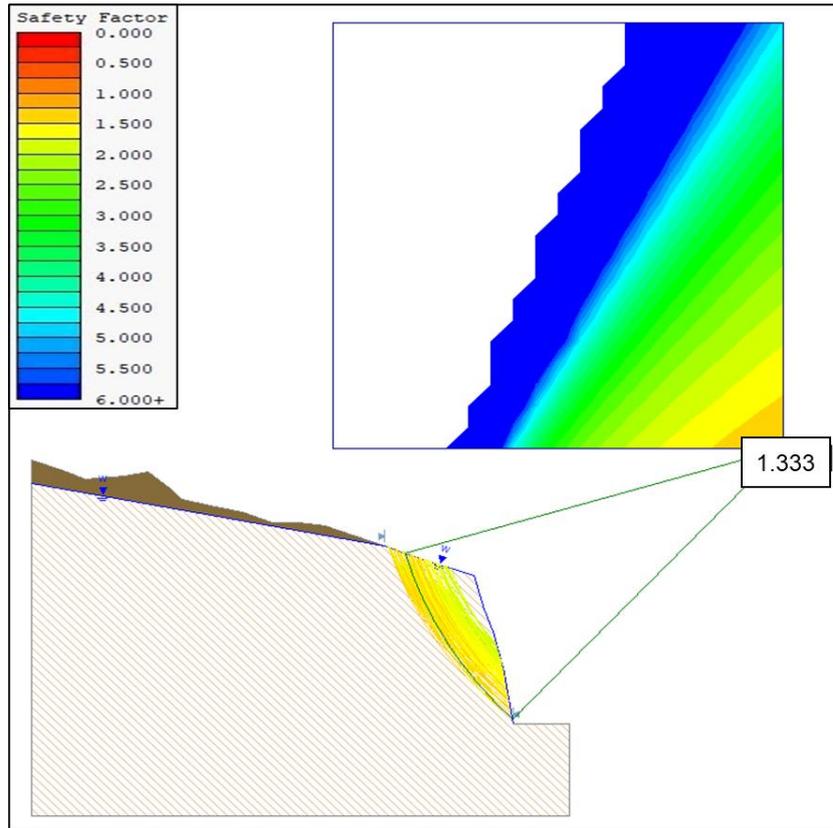


Figura 27. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.

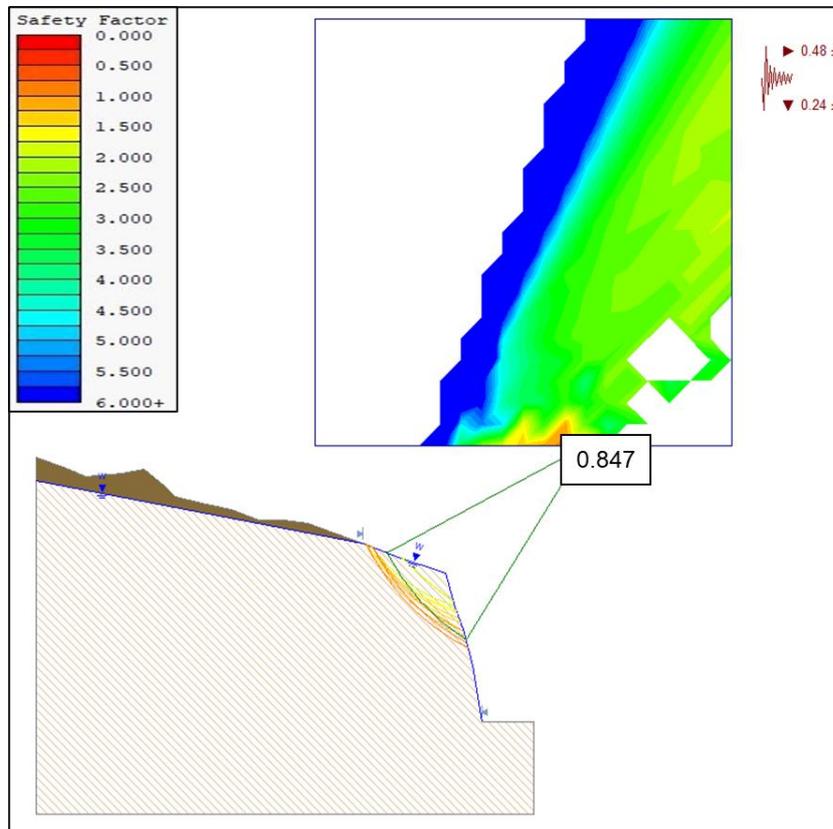


Figura 28. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.

3.11.3. Estación N°03

➤ Índice de Resistencia Geológica (GSI)

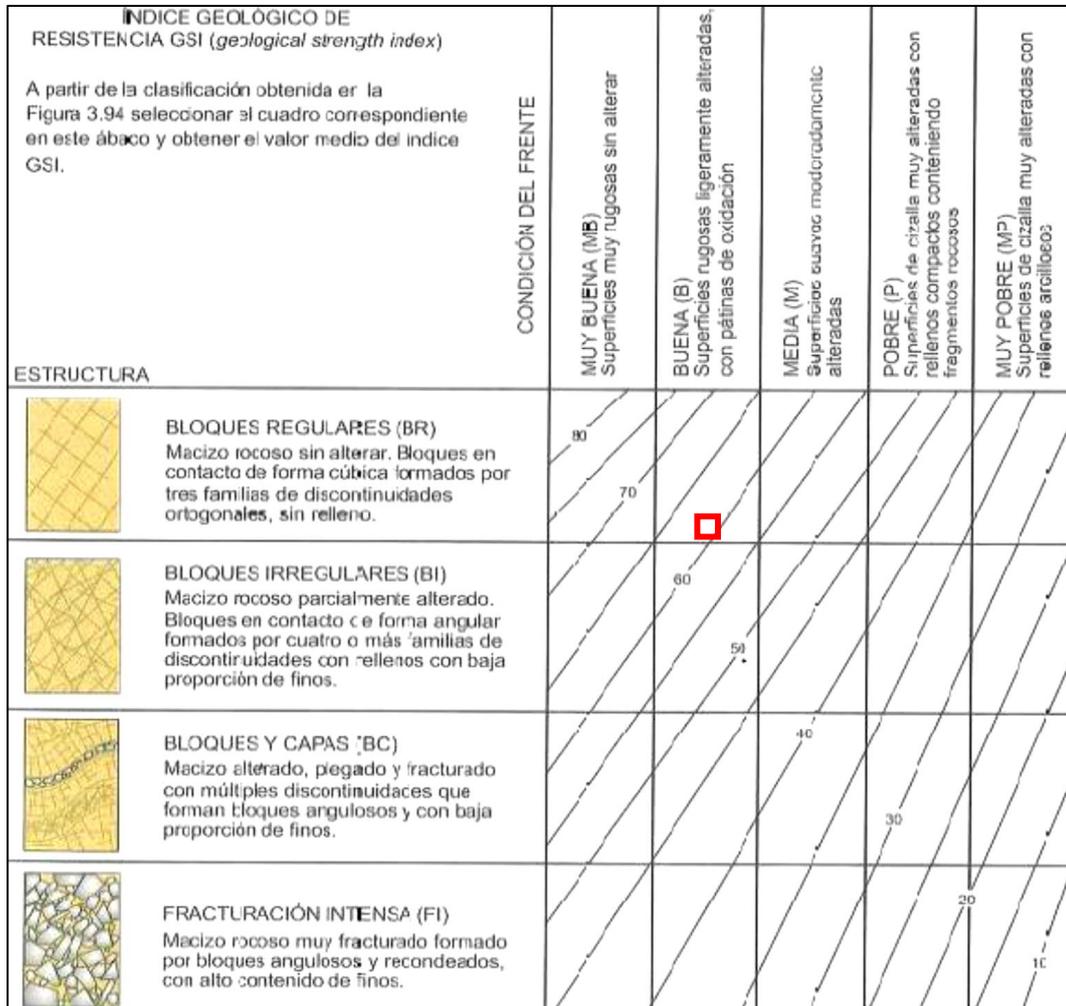


Figura 29. Valor de Índice de Resistencia Geológica.
Fuente: Gonzáles de Vallejo., (2004).

GSI=61.00

➤ Clasificación del Macizo Rocosó (RMR)

- Corrección de Valoración de Resistencia de la Roca Sana

Tabla 21.

Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.

CLASE	RESIST.	RESIST. UNIAxIAL Mpa	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Mpa	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA EN EL CAMPO
R4	Resistente	80	3	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.

Fuente: Brown, (1981).

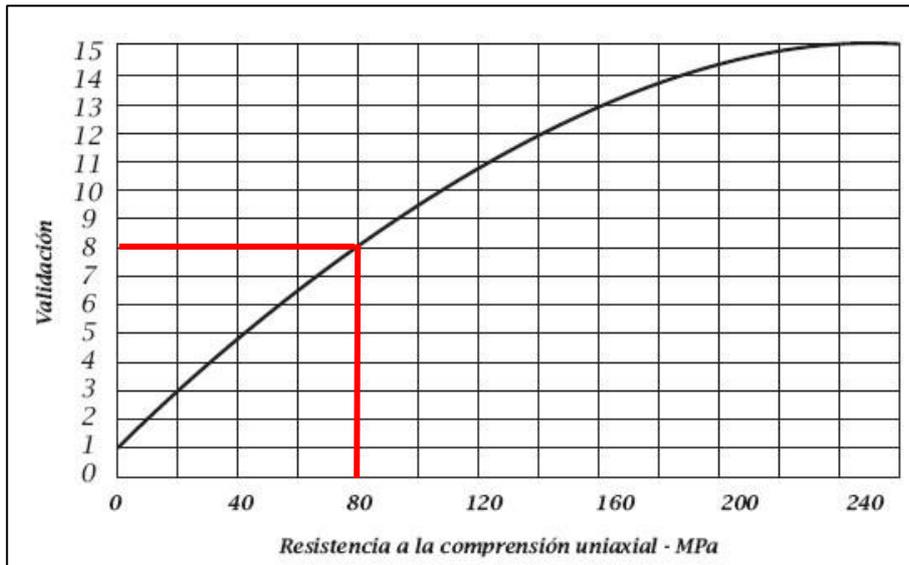


Figura 30. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.

- **Valoración: 8.**

- Corrección de Valoración de RQD

Longitud : 3.50 m

Nº de discontinuidades : 30

Lambda (λ) : 8.57

Cálculo del valor de RQD : $RQD=100 \cdot e^{(-0.1\lambda)} \cdot (0.1\lambda+1)$

RQD=78.81

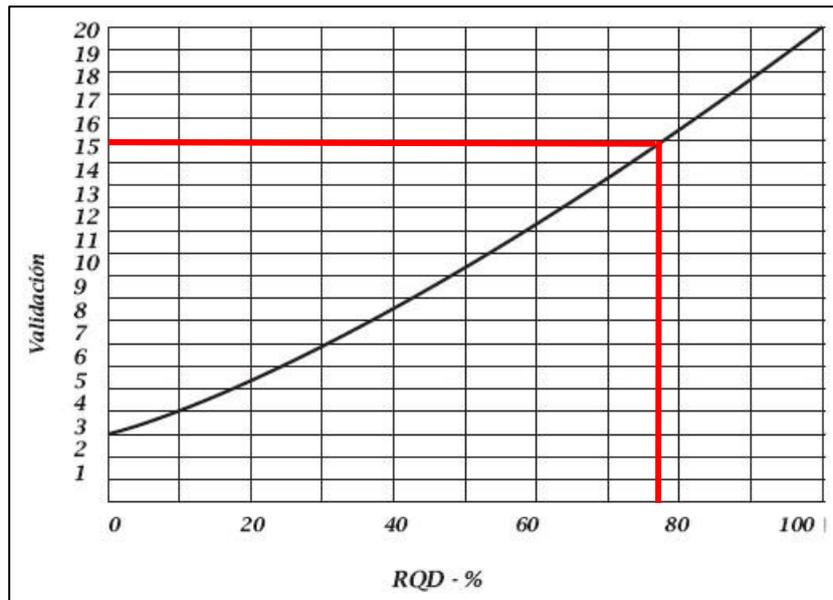


Figura 31. Abaco de corrección de valor de RQD.

- **Valoración: 16.**

- Valoración de Separación de Discontinuidades
 - Separación de Discontinuidades : Promedio de 0.2 a 0.6 m.
 - Valoración : 9
- Valoración de Estado de Discontinuidades
 - Persistencia : 1 a 3 m.
 - Valoración : 5
 - Abertura : 0.1 a 1.0 mm.
 - Valoración : 2
 - Rugosidad : Ligeramente Rugosa
 - Valoración : 3
 - Relleno : Sílice – duro de 5 mm aprox.
 - Valoración : 3
 - Alteración Meteórica : Moderadamente Alterada.
 - Valoración : 3
- Valoración de Presencia de Agua
 - Presencia de Agua : Húmedo a mojado.
 - Valoración : 9

Cálculo de valoración = 8+16+9+5+2+3+3+3+9 = 58

Tabla 22.
Valor obtenido de RMR y clasificación.

CLASE	VALOR RMR	CALIDAD DE ROCA
III	58	Regular

➤ RocData y Dips

Análisis y valores de las características físicas del macizo rocoso obtenidas del software de RocData:

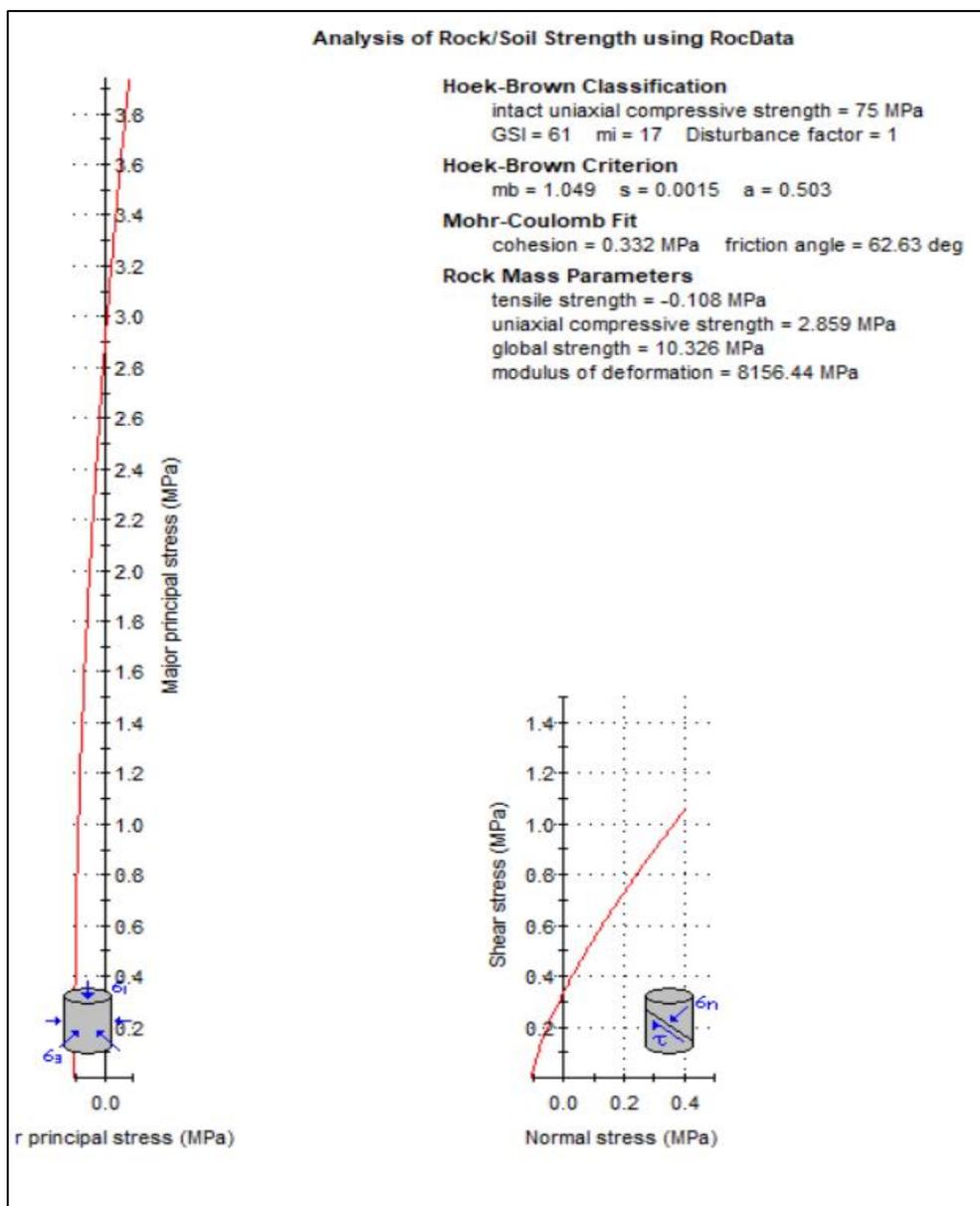


Figura 32. Análisis de Roca utilizando RocData.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 23.
Probabilidad de falla planar y cuña.

PROBABILIDAD DE FALLA	ESTACIÓN
	3
PLANAR	-
CUÑA	22.30%

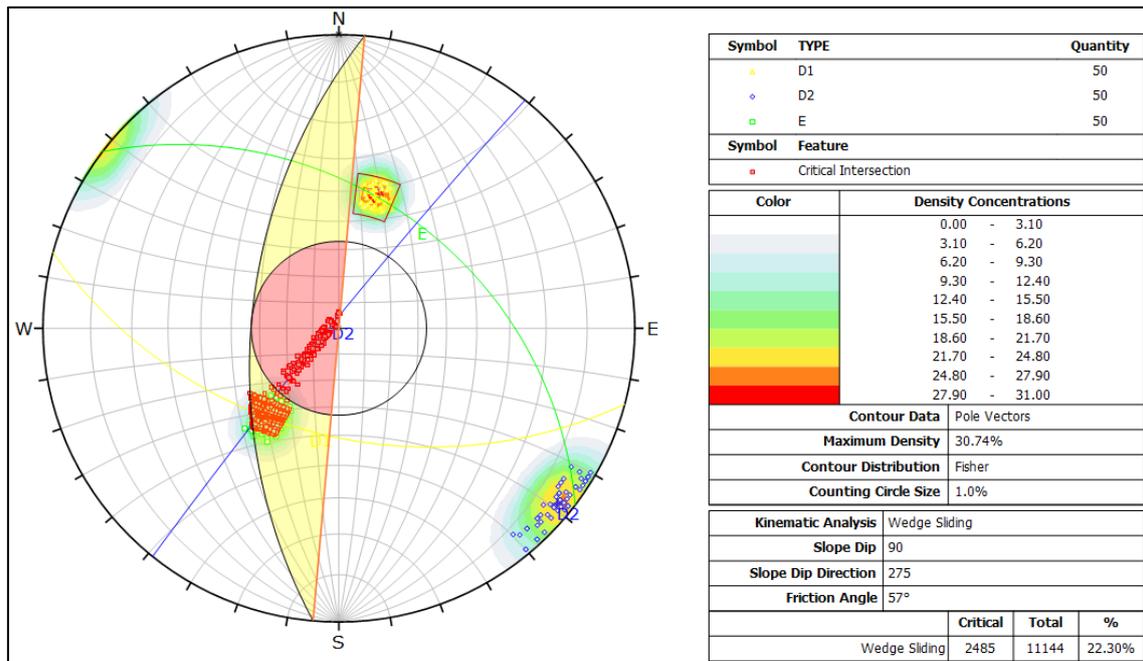


Figura 33. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips

➤ Análisis de Estabilidad

Con los datos obtenidos en campo y del software RocData se dispuso el análisis en el software Slide para obtener su valor de Factor de Seguridad. Este se realizó en tres estados: el primero natural, el segundo con saturación al 100%, el tercero con saturación al 100 % y sismicidad.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 24.
Factor de Seguridad.

FACTOR DE SEGURIDAD	ESTACIÓN
	3
NATURAL	1.752
SATURACIÓN 100 %	1.112
SATURACIÓN 100 % + SISMICIDAD	0.783

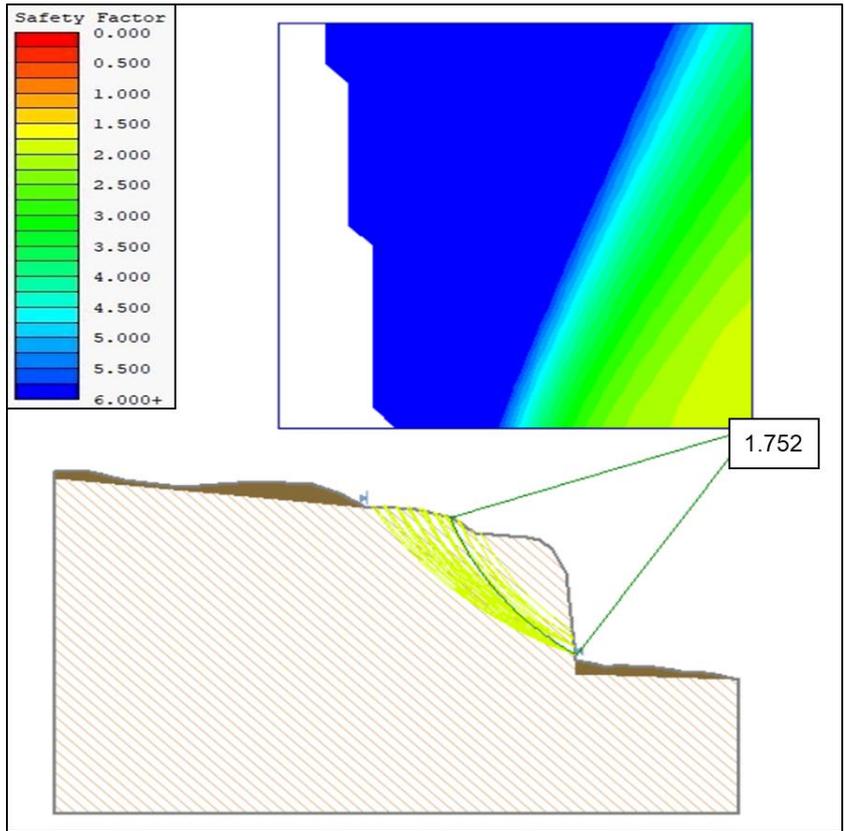


Figura 34. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.

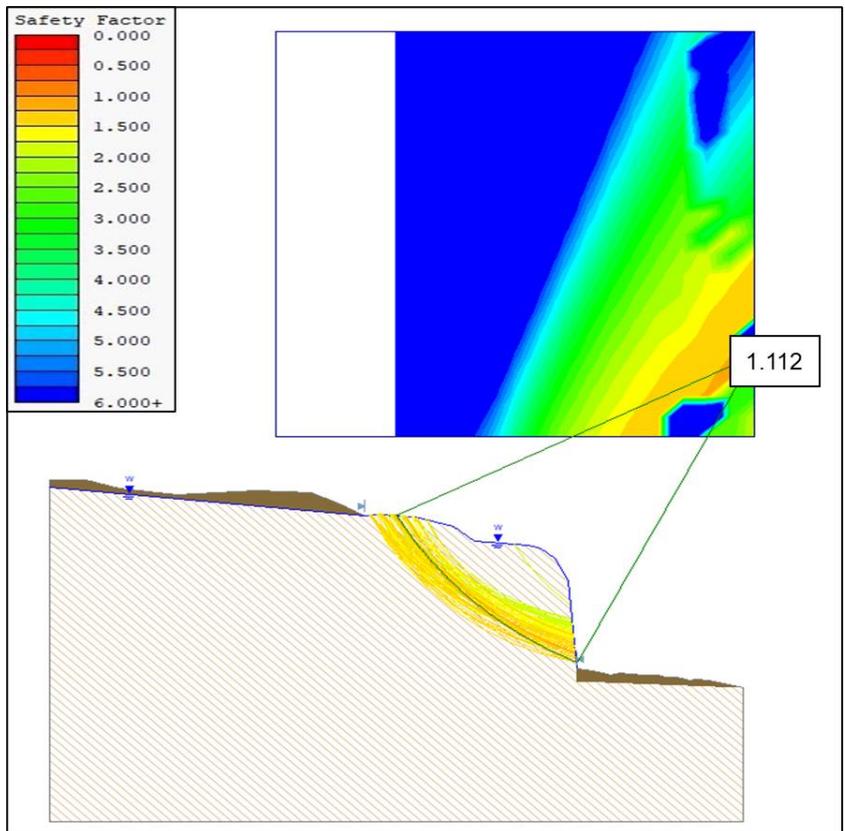


Figura 35. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.

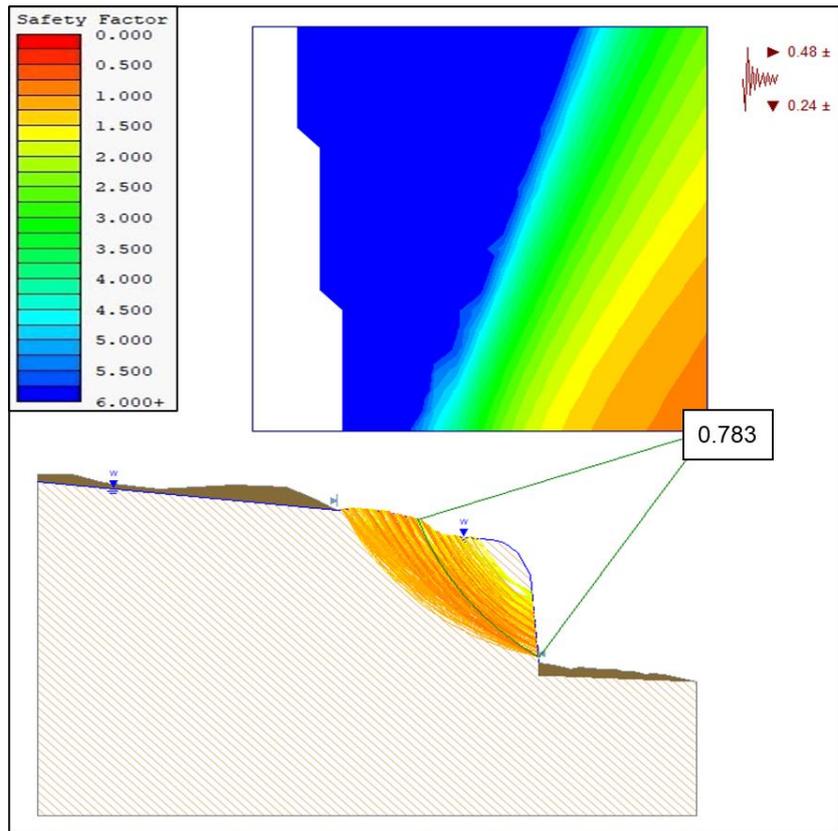


Figura 36. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.

3.11.4. Estación N°04

- Índice de Resistencia Geológica (GSI)

INDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>)		CONDICIÓN DEL FRENTE				
A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
ESTRUCTURA						
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70	60	50	40
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.					
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.					
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.					

Figura 37. Valor de Índice de Resistencia Geológica.
Fuente: Gonzáles de Vallejo., (2004).

GSI=56.00

➤ Clasificación del Macizo Rocos (RMR)

- Corrección de Valoración de Resistencia de la Roca Sana

Tabla 25.
Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.

CLASE	RESIST.	RESIST. UNIAXIAL Mpa	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Mpa	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA EN EL CAMPO
R4	Resistente	80	3	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.

Fuente: Brown, (1981).

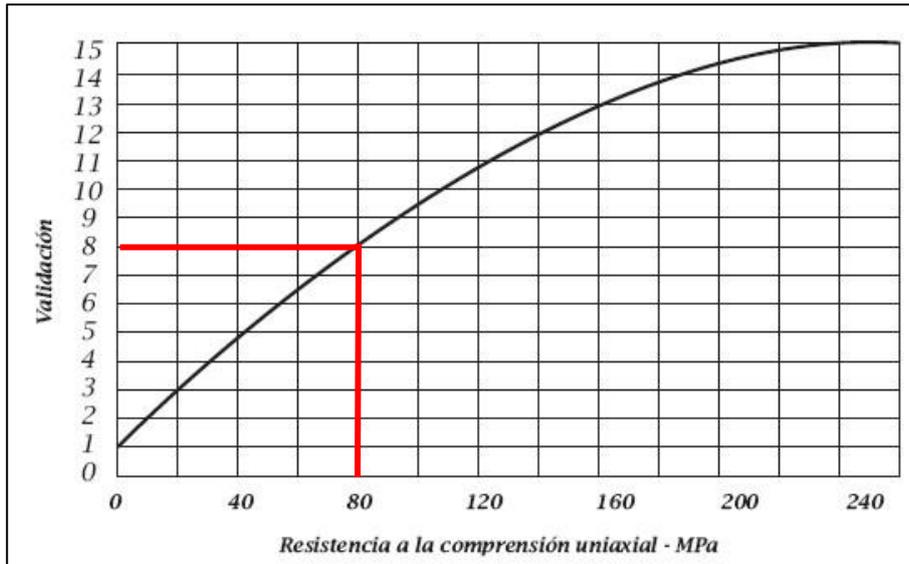


Figura 38. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.

- **Valoración: 8.**

- Corrección de Valoración de RQD

Longitud : 2.00 m

Nº de discontinuidades : 22

Lambda (λ) : 11.00

Cálculo del valor de RQD : $RQD=100 \cdot e^{(-0.1\lambda)} \cdot (0.1\lambda+1)$

RQD=69.90

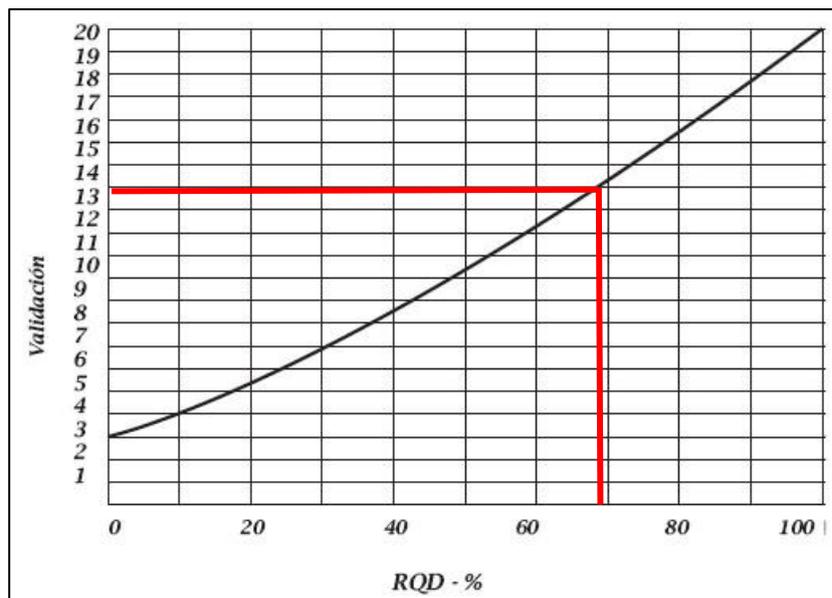


Figura 39. Abaco de corrección de valor de RQD.

- **Valoración: 15.**

- Valoración de Separación de Discontinuidades
 - Separación de Discontinuidades : promedio de 0.6 a 2.0 metros
 - Valoración : 15
- Valoración de Estado de Discontinuidades
 - Persistencia : 3 – 10 m
 - Valoración : 1
 - Abertura : 0.1 – 1.1 mm
 - Valoración : 3
 - Rugosidad : Rugosa a ligeramente rugosa.
 - Valoración : 4
 - Relleno : Sílice – duro >5mm.
 - Valoración : 3
 - Alteración Meteórica : Moderadamente Alterada.
 - Valoración : 3
- Valoración de Presencia de Agua
 - Presencia de Agua : Húmedo.
 - Valoración : 6

Cálculo de valoración = 8+15+15+1+3+4+3+3+6= 58

Tabla 26.
Valor obtenido de RMR y clasificación.

CLASE	VALOR RMR	CALIDAD DE ROCA
III	58	Regular

➤ RocData y Dips

Análisis y valores de las características físicas del macizo rocoso obtenidas del software de RocData:

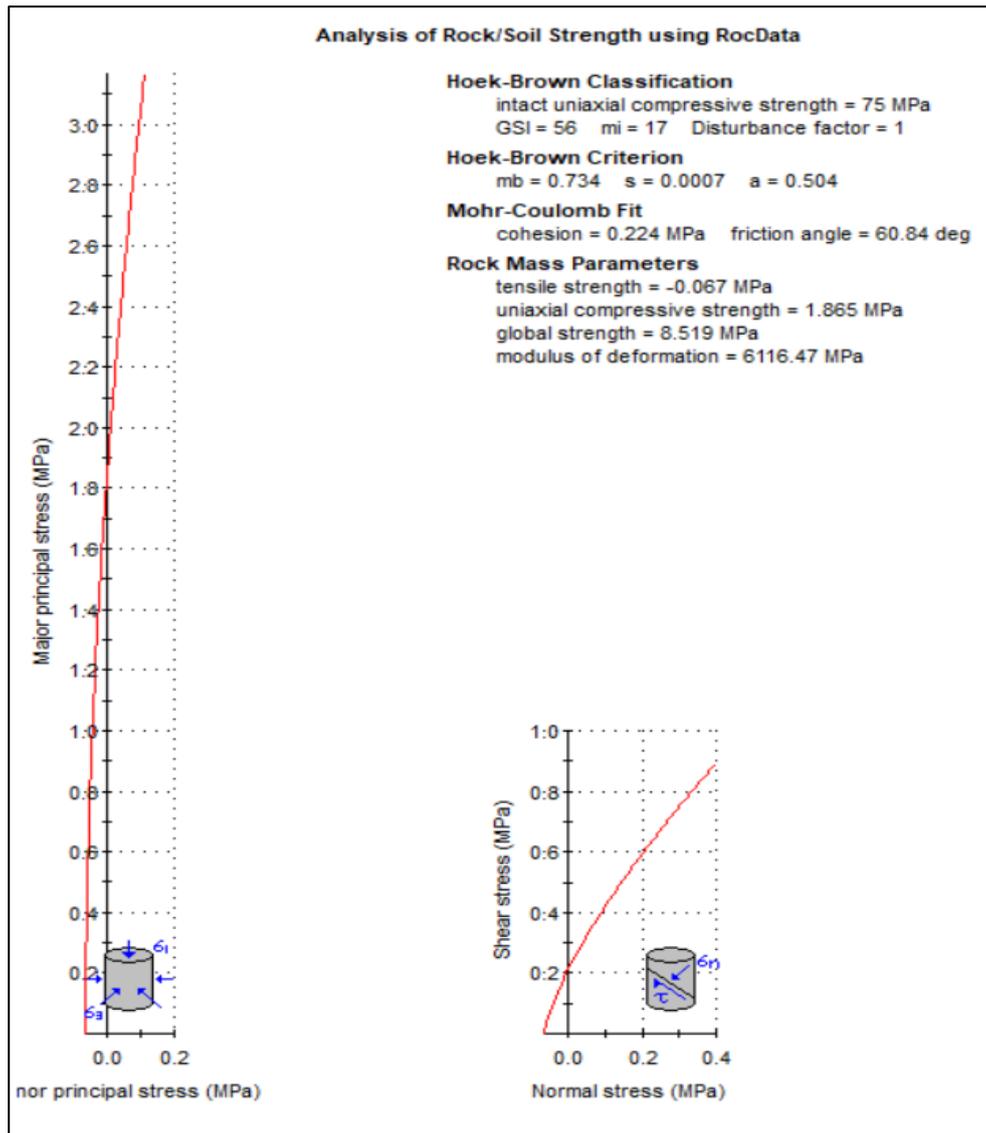


Figura 40. Análisis de Roca utilizando RocData.

Tabla 27.
 Probabilidad de falla planar y cuña.

PROBABILIDAD DE FALLA	ESTACIÓN
PLANAR	4
CUÑA	-
	2.08%

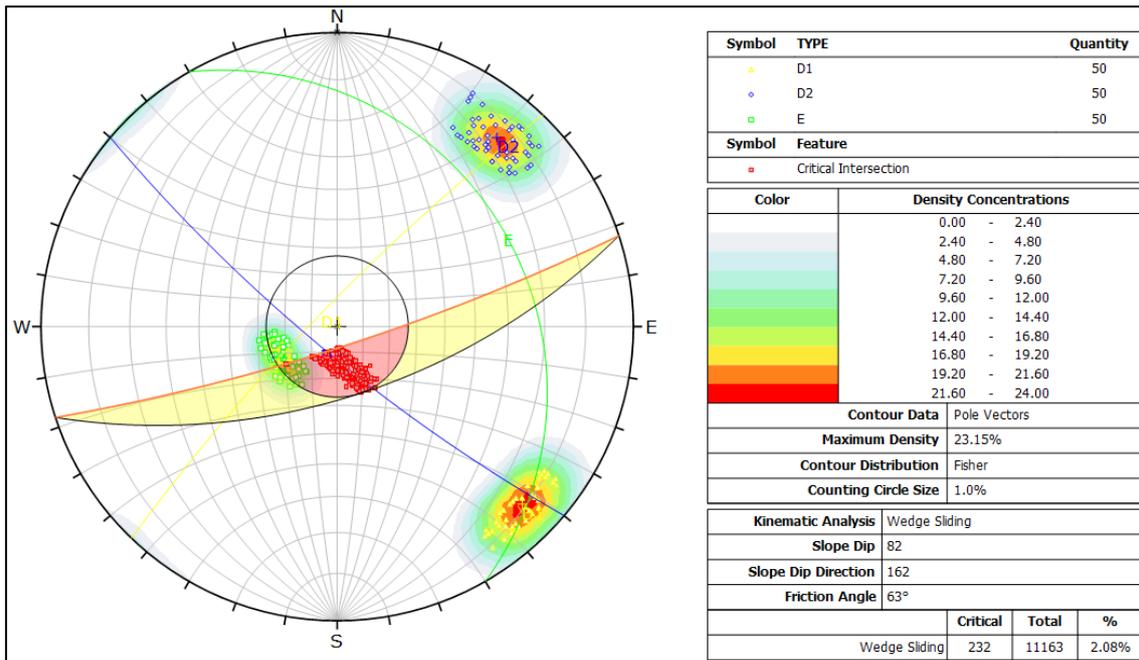


Figura 41. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips

➤ Análisis de Estabilidad

Con los datos obtenidos en campo y del software RocData se dispuso el análisis en el software Slide para obtener su valor de Factor de Seguridad. Este se realizó en tres estados: el primero natural, el segundo con saturación al 100%, el tercero con saturación al 100 % y sismicidad.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 28.
Factor de Seguridad.

FACTOR DE SEGURIDAD	ESTACIÓN
NATURAL	4
SATURACIÓN 100 %	1.662
SATURACIÓN 100 % + SISMICIDAD	1.131
	0.785

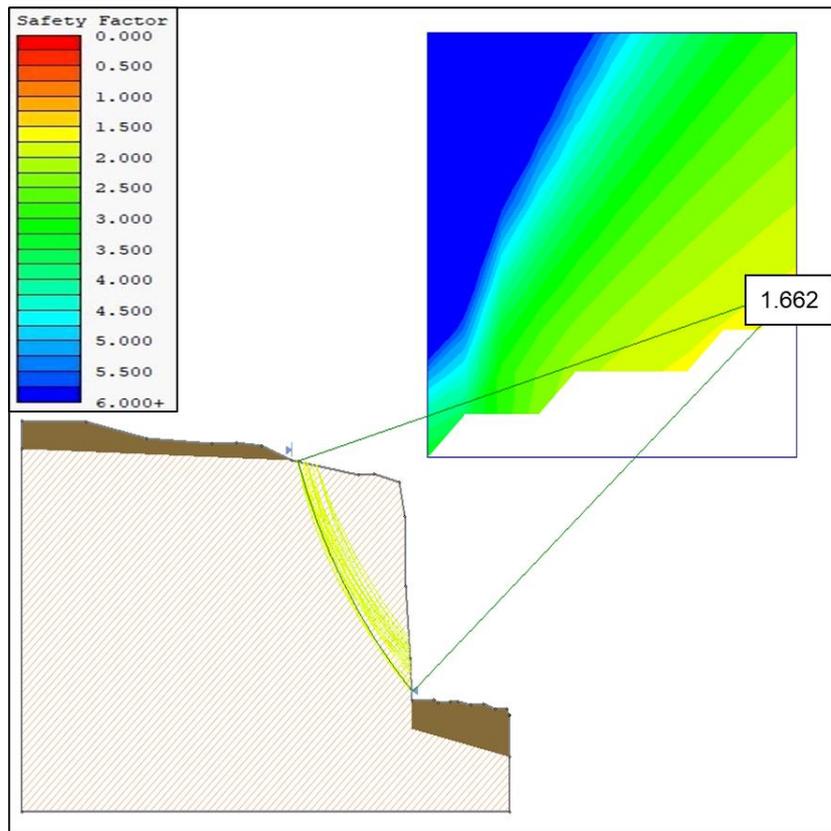


Figura 42. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.

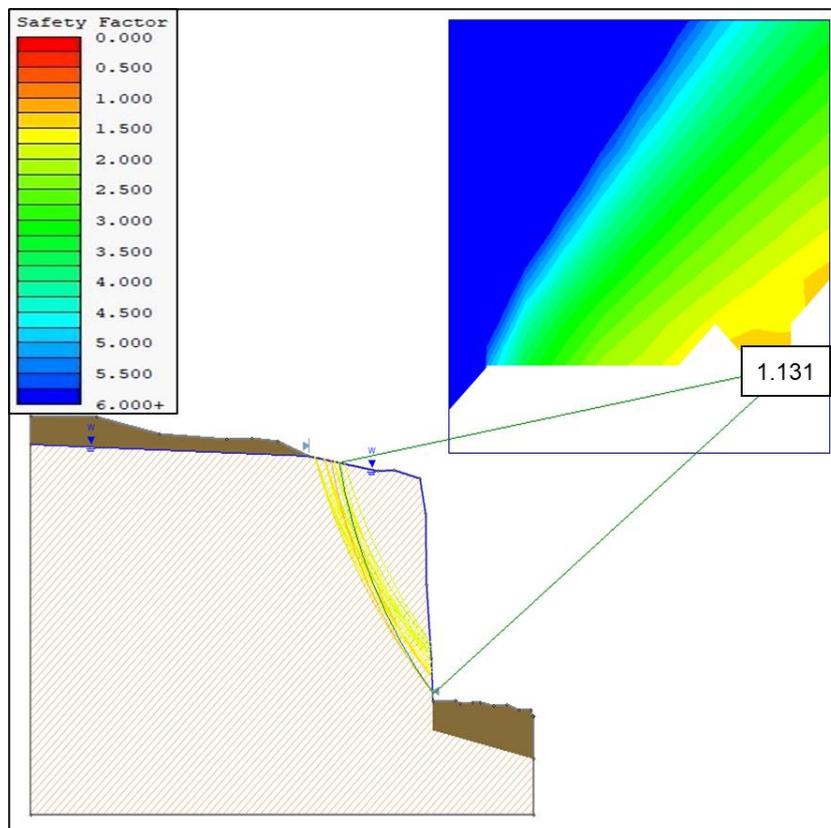


Figura 43. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.

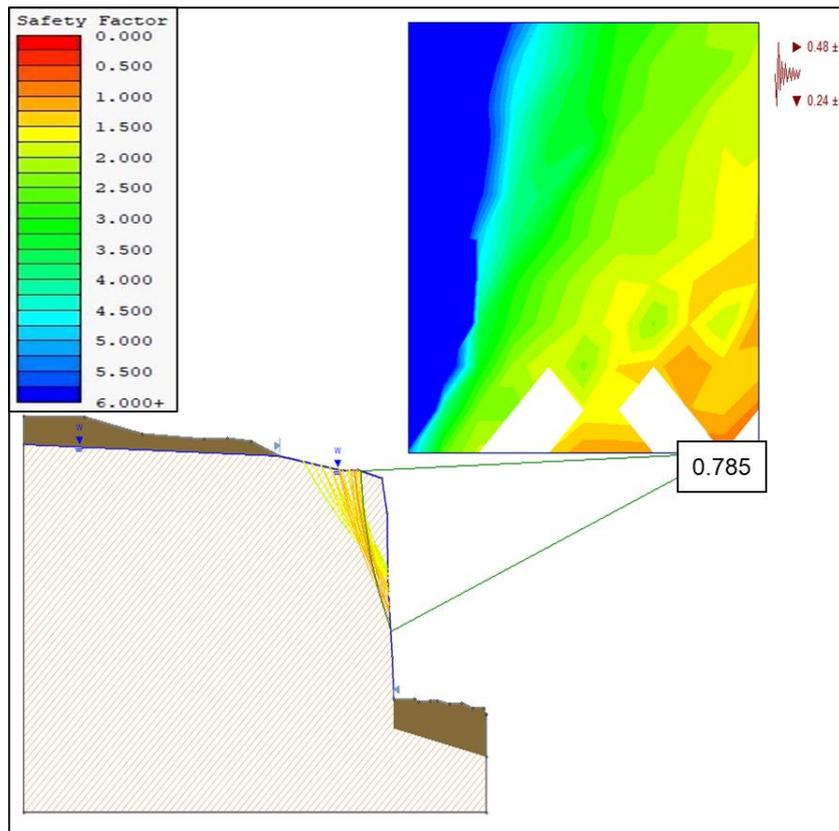


Figura 44. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.

3.11.5. Estación N°05

- Índice de Resistencia Geológica (GSI)

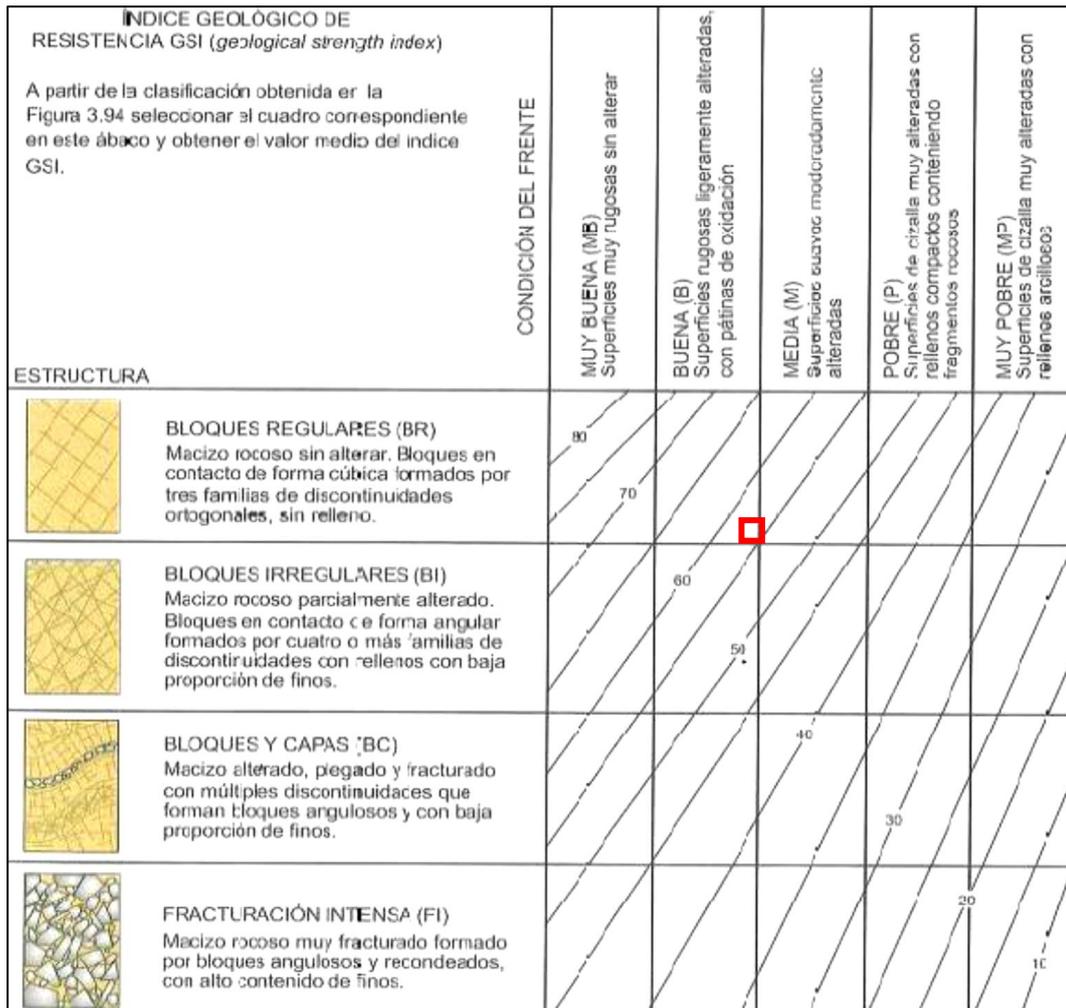


Figura 45. Valor de Índice de Resistencia Geológica.
Fuente: Gonzáles de Vallejo., (2004).

GSI=55.00

➤ Clasificación del Macizo Rocos (RMR)

- Corrección de Valoración de Resistencia de la Roca Sana

Tabla 29.
 Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en campo.

CLASE	RESIST.	RESIST. UNIAxIAL Mpa	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Mpa	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA EN EL CAMPO
R4	Resistente	80	3	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.

Fuente: Brown, (1981).

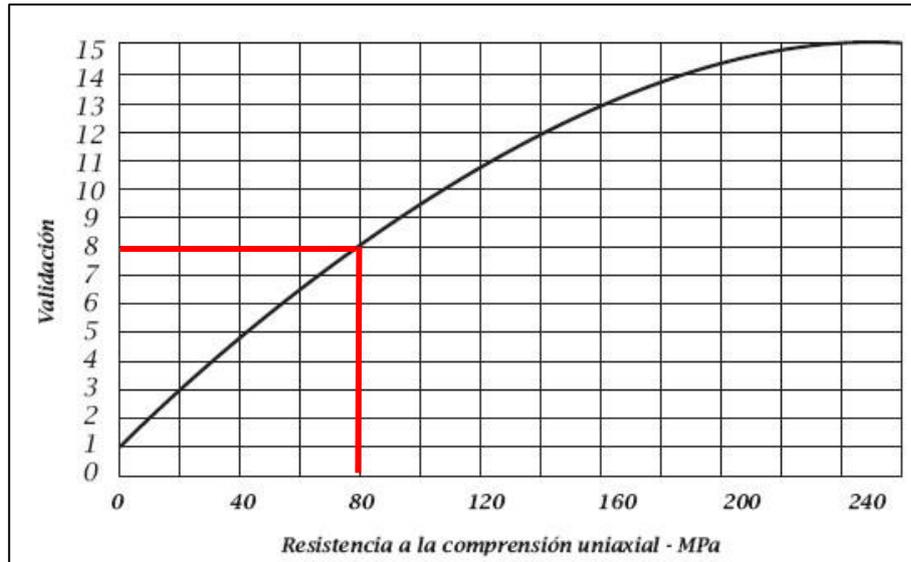


Figura 46. Abaco de corrección de valor para la compresión uniaxial.

- **Valoración:** 8.

- Corrección de Valoración de RQD

Longitud : 3.00 m
 N° de discontinuidades : 34
 Lambda (λ) : 11.33
 Cálculo del valor de RQD : $RQD=100 \cdot e^{(-0.1\lambda)} \cdot (0.1\lambda+1)$
 $RQD=68.68$

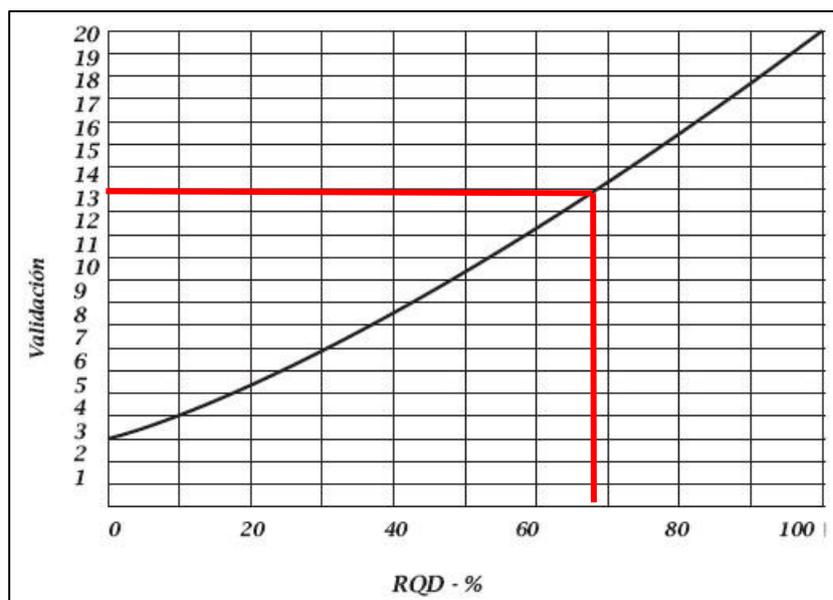


Figura 47. Abaco de corrección de valor de RQD.

- **Valoración: 15.**

- Valoración de Separación de Discontinuidades

- Separación de Discontinuidades : promedio de 0.6 a 2.0 metros
- Valoración : 15

- Valoración de Estado de Discontinuidades

- Persistencia : 3 – 10 m
- Valoración : 1
- Abertura : 0.1 – 1.1 mm
- Valoración : 3
- Rugosidad : Rugosa a ligeramente rugosa.
- Valoración : 4
- Relleno : Sílice – duro >5mm.
- Valoración : 3
- Alteración Meteórica : Moderadamente Alterada.
- Valoración : 3

- Valoración de Presencia de Agua

- Presencia de Agua : Húmedo.
- Valoración : 6

Cálculo de valoración = 8+15+15+1+3+4+3+3+6 = 58

Tabla 30.
Valor obtenido de RMR y clasificación.

CLASE	VALOR RMR	CALIDAD DE ROCA
III	58	Regular

➤ RocData y Dips

Análisis y valores de las características físicas del macizo rocoso obtenidas del software de RocData:

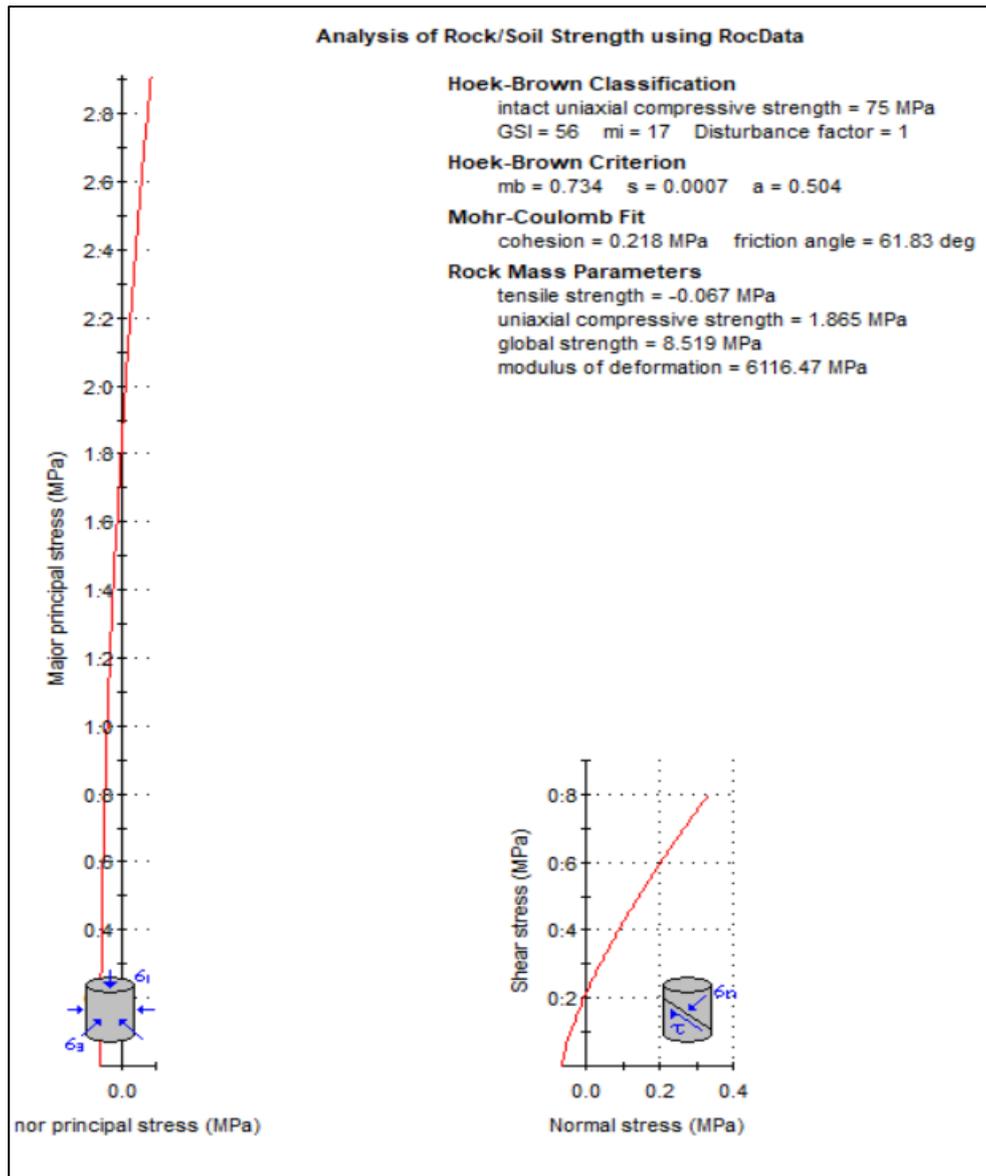


Figura 48. Análisis de Roca utilizando RocData.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 31.
 Probabilidad de falla planar y cuña.

PROBABILIDAD DE FALLA	ESTACIÓN
	5
PLANAR	26.00%
CUÑA	24.67%

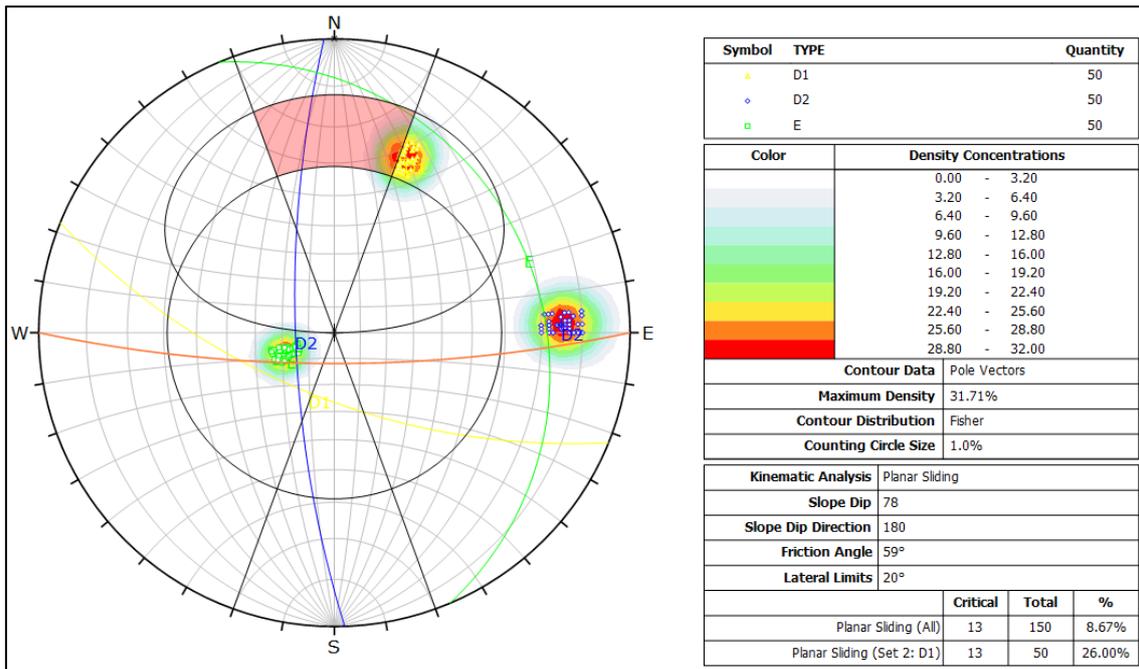


Figura 49. Análisis de posibilidad de rotura planar, Software Dips.

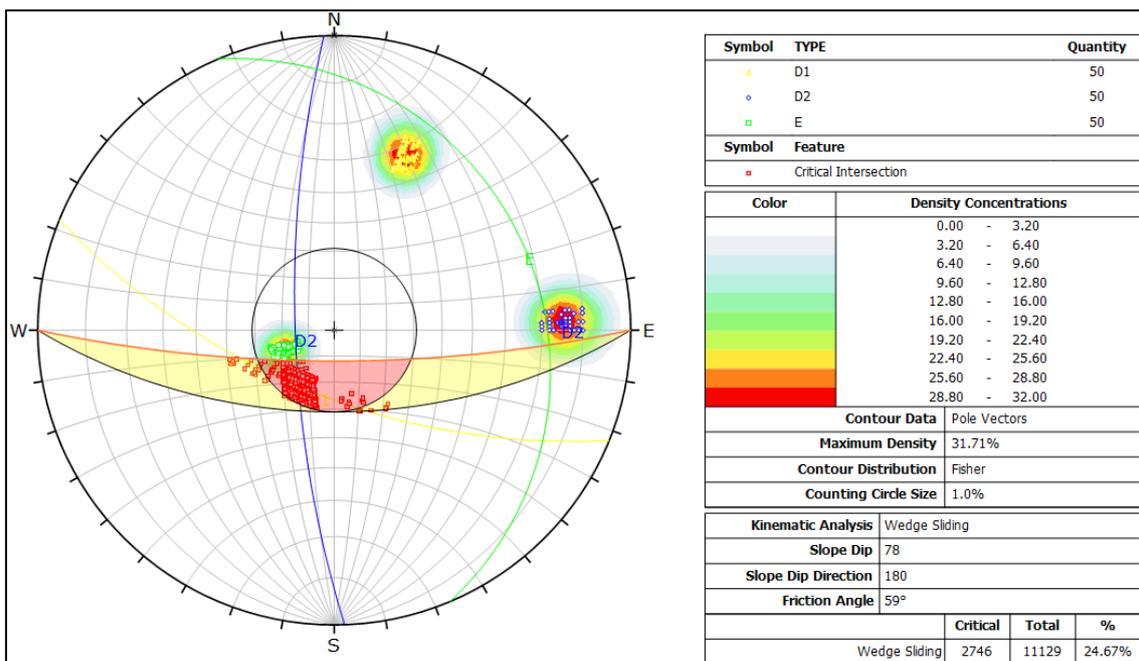


Figura 50. Análisis de posibilidad de rotura en cuña, Software Dips

➤ Análisis de Estabilidad

Con los datos obtenidos en campo y del software RocData se dispuso el análisis en el software Slide para obtener su valor de Factor de Seguridad. Este se realizó en tres estados: el primero natural, el segundo con saturación al 100%, el tercero con saturación al 100 % y sismicidad.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 32.
Factor de Seguridad.

FACTOR DE SEGURIDAD	ESTACIÓN
NATURAL	1.666
SATURACIÓN 100 %	1.051
SATURACIÓN 100 % + SISMICIDAD	0.755

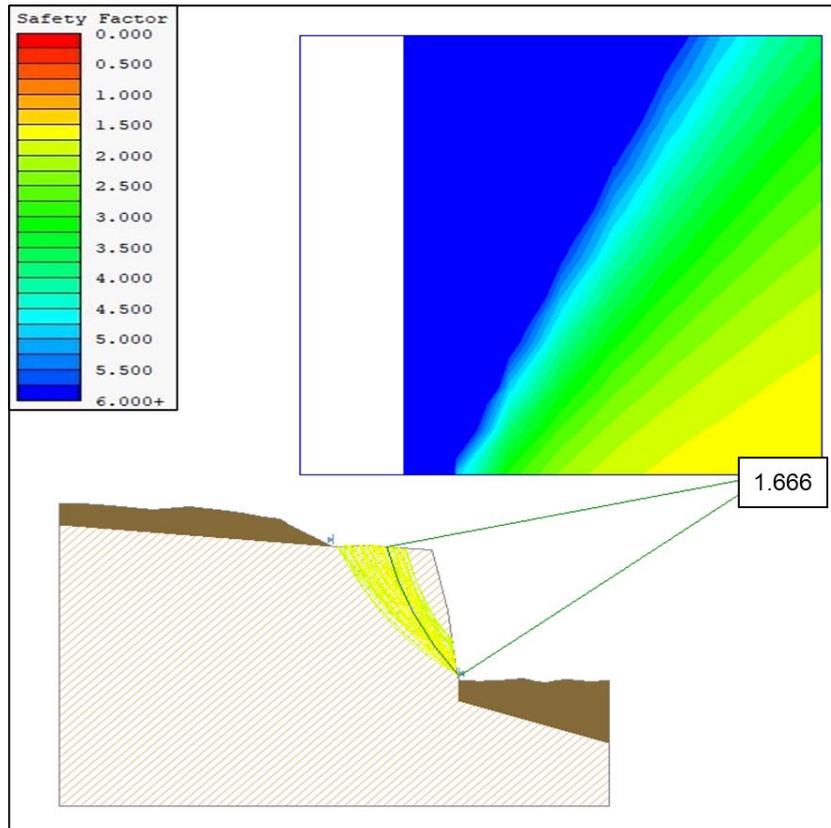


Figura 51. Análisis de estabilidad. FS sin saturación ni sismicidad.

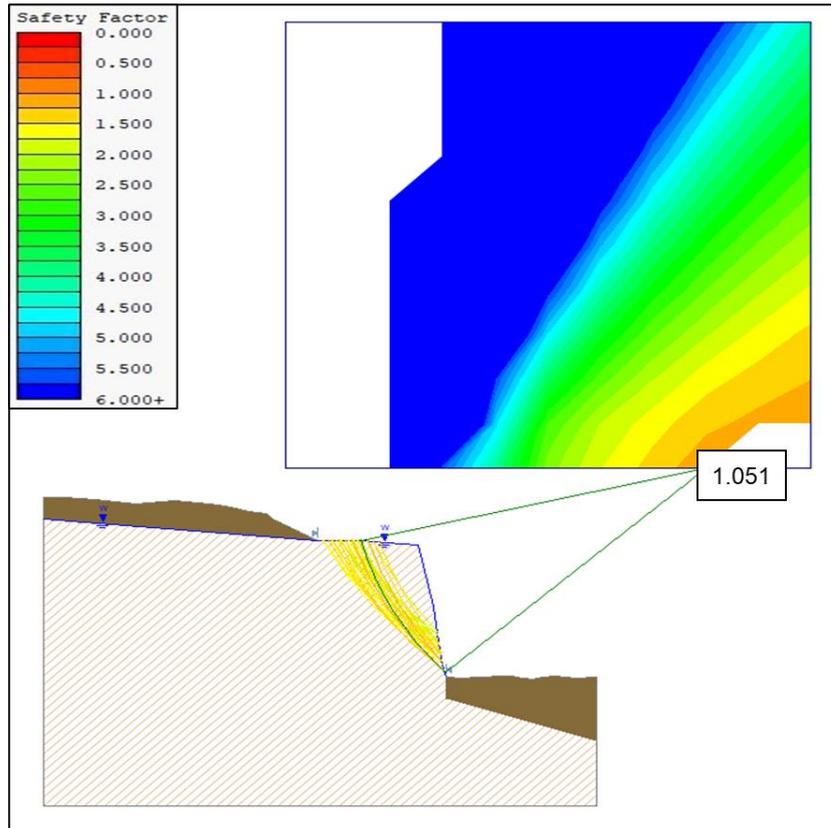


Figura 52. Análisis de estabilidad. FS con saturación, sin sismicidad.

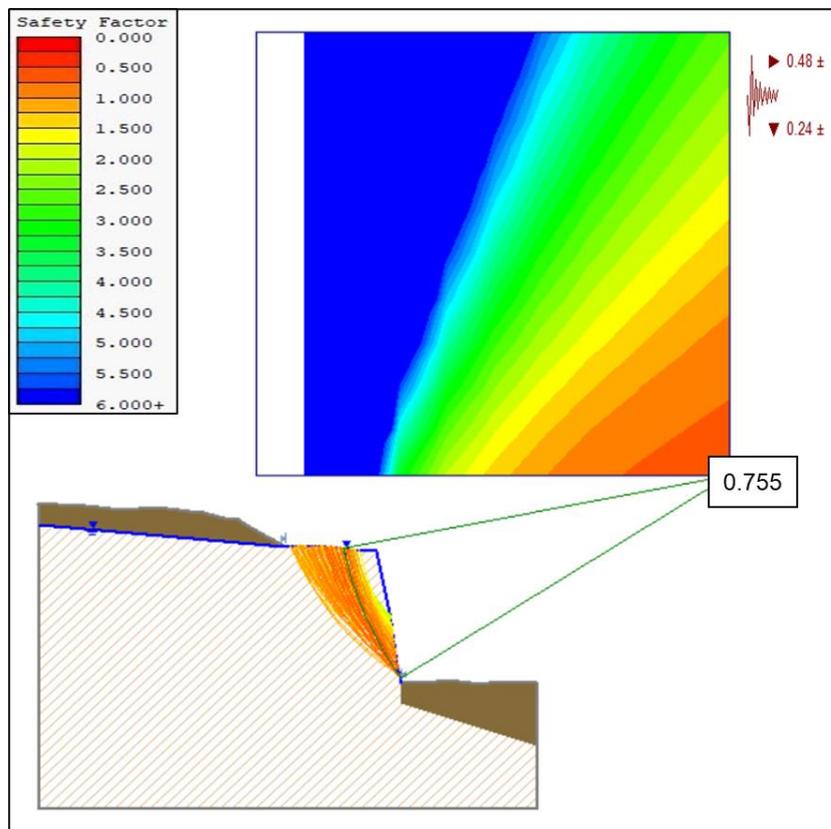


Figura 53. Análisis de estabilidad. FS con saturación y sismicidad.

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de la presentación de los datos en el capítulo anterior, se procedió con el análisis e interpretación de los resultados en función de los objetivos planteados. A continuación, se expone el desarrollo correspondiente.

El objetivo principal de esta investigación fue analizar el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos en el Cerro Carambayo para la evaluación de la inestabilidad de laderas en la zona de Paríamarca, Cajamarca. Para ello, se consideraron diversos aspectos geológicos, geomorfológicos, hidroclimáticos y geomecánicos.

En primer lugar, se analizó el macizo rocoso, identificando que la litología predominante corresponde a areniscas ferruginosas de la Formación Chimú, con granulometría media a fina. Estos afloramientos se ubican principalmente en las zonas noreste y suroeste del cerro. Las rocas presentan meteorización física leve, evidencias de oxidación de minerales ferrosos y un alto grado de fracturamiento asociado a procesos de meteorización, alteración y movimientos de masas. Se observa también una estratificación visible que ha sido afectada por agentes exógenos. En las partes bajas del cerro, el macizo rocoso se encuentra cubierto por depósitos aluviales compuestos por gravas y bolones subangulosos a angulosos, poco compactados, con una matriz arenosa y un bajo contenido de arcilla. Asimismo, se evidenció presencia de cobertura vegetal que podría contribuir a la retención de humedad superficial.

En cuanto a la geomorfología, se aplicó la clasificación de Rodríguez (2016), observándose que el área de estudio presenta pendientes que oscilan entre 0° y 50°, distribuidas en formas de planicies, lomadas y laderas. Las laderas, por su

inclinación y condiciones estructurales, representan zonas de alta susceptibilidad a deslizamientos. Para evaluar los factores detonantes se consideraron la saturación del suelo por precipitaciones y la sismicidad de la zona. La precipitación se evaluó mediante datos mensuales obtenidos del SENAMHI para el periodo 2019–2023, mientras que la amenaza sísmica se determinó utilizando la zonificación sísmica proporcionada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019), estableciendo valores de aceleración horizontal ($V_h = 0.48$) y vertical ($V_v = 0.24$).

El análisis de los datos pluviométricos evidenció una importante variabilidad interanual. En 2019 se registró una precipitación promedio de 1.23 mm/h, la cual disminuyó a 0.84 mm/h en 2021, alcanzando su punto más bajo en 2022 con tan solo 0.28 mm/h. Sin embargo, en 2023 se observó un repunte considerable, con un promedio anual de 2.00 mm/h. Esta fluctuación sugiere posibles influencias de eventos climáticos como El Niño o La Niña. A nivel mensual, los meses de mayor precipitación fueron abril (2.32 mm/h), diciembre (1.81 mm/h), enero (1.71 mm/h) y febrero (1.67 mm/h), coincidiendo con la estación lluviosa. Por el contrario, junio, julio y agosto representaron la estación seca, con valores promedio inferiores a 0.30 mm/h. Esta información fue clave para establecer escenarios de saturación total.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se definieron cinco estaciones de análisis geotécnico estratégicamente distribuidas. En cada una de ellas se evaluaron las propiedades geomecánicas del macizo utilizando los sistemas GSI y RMR. Todas las estaciones presentaron macizos levemente meteorizados, con diaclasas rellenas de material arenoso y escaso contenido de arcilla. Los valores de GSI fueron: 59.00 para las estaciones N° 01 y N° 02, 61.00 para la estación N° 03, y 56.00 para las estaciones N° 04 y N° 05. Por otro lado, el sistema RMR arrojó valores de 57 para las estaciones N° 01 y N° 02, mientras que las estaciones N° 03, N° 04 y N° 05 alcanzaron 58. Estos resultados indican una calidad de roca regular, coincidente con los rangos establecidos por Bieniawski (1989). Comparativamente, Oros (2018) reportó valores entre 9 y 36 para macizos clasificados como malos a muy malos, mientras

que Rivera (2022) obtuvo valores entre 54 y 57 en areniscas similares, reafirmando la condición regular del macizo en esta investigación.

Se evaluó la estructura del macizo mediante el levantamiento de datos estructurales (Dip y Dip Direction) y su análisis con el software Dips, aplicando la metodología de Coello (2020), Rivasplata (2019) y Arteaga (2017). Se identificaron familias de diaclasas D1 y D2, además de planos de estratificación E. A partir de este análisis se calcularon las probabilidades de falla planar y en cuña por estación.

En cuanto a la probabilidad de falla planar, la estación N° 01 presentó la mayor susceptibilidad con un 94%, seguida por la estación N° 05 con un 26% y la estación N° 02 con un 4%. Las estaciones N° 03 y N° 04 no mostraron condiciones geométricas favorables para este tipo de falla. Para la probabilidad de falla en cuña, la estación N° 01 nuevamente fue la más crítica con un 43%, mientras que las estaciones N° 02, N° 03 y N° 05 presentaron probabilidades moderadas de 23.43%, 22.30% y 24.67% respectivamente. La estación N° 04 mostró la menor probabilidad con 2.08%.

Posteriormente, se realizó el análisis de estabilidad mediante el cálculo del factor de seguridad (FS) con el software RocData, aplicando el criterio Hoek-Brown, y la simulación en Slide, siguiendo las metodologías de Marín (2019) y Arteaga (2017). Se consideraron tres escenarios: condiciones naturales (sin perturbaciones), saturación total por agua y la combinación de saturación con sismicidad, al igual que en el estudio de Valdera (2019).

Los resultados del FS fueron los siguientes:

- Estación N° 01: FS natural 1.942; saturado 1.213; saturado + sismo 0.819.
- Estación N° 02: FS natural 1.885; saturado 1.333; saturado + sismo 0.847.
- Estación N° 03: FS natural 1.752; saturado 1.112; saturado + sismo 0.783.
- Estación N° 04: FS natural 1.662; saturado 1.131; saturado + sismo 0.785.
- Estación N° 05: FS natural 1.666; saturado 1.051; saturado + sismo 0.755.

A través del análisis comparativo, se determinó que todas las estaciones presentan una adecuada estabilidad en condiciones naturales ($FS > 1.5$), pero al ser sometidas a escenarios de saturación total y sismicidad, los factores de seguridad disminuyen de forma considerable, comprometiendo la estabilidad estructural. La estación N° 01 es la más vulnerable, con una pérdida crítica de estabilidad ($FS = 0.819$ en condiciones extremas). En contraste, la estación N° 03, aunque parte con el FS más bajo en condiciones naturales (1.752), muestra la mayor resistencia relativa frente a la saturación y sismicidad, manteniéndose con un FS de 0.783. Las estaciones N° 02 y N° 04 reflejan un comportamiento intermedio, mientras que la estación N° 05, a pesar de su buena estabilidad inicial, se posiciona como una de las más inestables bajo condiciones combinadas.

Finalmente, al comparar estos resultados con los obtenidos por Mucuta et al. (2020) y Caruanambo (2017), quienes reportan inestabilidad en intervalos de FS entre 1 y 0.5, se confirma que varias estaciones del Cerro Carambayo se encuentran en situación crítica. No obstante, los valores de FS en estado natural concuerdan con los de Rivera (2022), indicando estabilidad de laderas en macizos rocosos de arenisca cuando no existen perturbaciones externas.

4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Los afloramientos de macizos rocosos en el Cerro Carambayo presentan un comportamiento geotécnicamente inestable, principalmente debido a la presencia de fracturas ocasionadas por múltiples familias de diaclasas. Estas estructuras de fracturamiento debilitan el macizo rocoso al crear planos de debilidad que facilitan la desintegración y el desplazamiento de bloques de roca. Además, factores externos como la precipitación anual y la actividad sísmica en la región agravan esta inestabilidad. Los estudios realizados permitieron corroborar la hipótesis, ya que se observó que la estabilidad de los macizos rocosos es considerablemente mayor en su estado natural, pero se ve gravemente comprometida cuando se someten a condiciones de saturación y sismicidad.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El análisis geotécnico desarrollado evidencia una marcada variabilidad en la estabilidad de los macizos rocosos constituidos por areniscas de la Formación Chimú. Esta inestabilidad está estrechamente relacionada con la sismicidad, saturación hídrica y pendiente del terreno.

La estación N° 01 se identificó como la más susceptible a fallas bajo condiciones extremas, mientras que la estación N° 03 mostró el mejor desempeño estructural frente a saturación y actividad sísmica.

Las propiedades geomecánicas, evaluadas a través de los sistemas GSI y RMR, revelan calidad de roca regular en todas las estaciones. El GSI más alto está en la estación N° 03 (61.00), mientras que el RMR se mantuvo en rangos de 57 a 58, lo que corrobora una resistencia media con presencia de fracturamiento y meteorización leve.

El análisis del factor de seguridad reflejó estabilidad en estado natural para las cinco estaciones, con valores superiores a 1.5. No obstante, al simular condiciones de saturación y sismicidad, todos mostraron una reducción drástica. La estación N° 01 pasó de un FS natural de 1.942 a 0.819, lo que representa una pérdida crítica de estabilidad. En contraste, la estación N° 03 mostró mayor resiliencia, manteniéndose con un FS de 0.783 en el escenario más desfavorable.

El análisis estructural con Dips confirmó la susceptibilidad a fallas. La estación N° 01 tiene una probabilidad de 94% para fallas planares y 43% para fallas en cuña, consolidándose como el punto de mayor riesgo. Las estaciones N°s. 02, 03 y 05 presentaron probabilidades moderadas de falla en cuña, mientras que la estación

N° 04 tiene la menor probabilidad, sugiriendo una mayor estabilidad en este aspecto.

5.2. RECOMENDACIONES

Implementar nuevas estaciones en diferentes puntos de la zona de investigación para obtener un análisis más representativo del comportamiento geotécnico.

Realizar ensayos complementarios, como compresión no confinada y triaxiales, para profundizar en la caracterización mecánica del macizo rocoso.

Ampliar el área de estudio hacia más estaciones y zonas críticas, a fin de evaluar con mayor precisión la resistencia del macizo bajo distintas condiciones de saturación y sismicidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arteaga, N. 2017.** Análisis geológico – geotécnico en los taludes de la carretera Choropampa – Magdalena. Cajamarca. [en línea]. Recuperado en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1668>
- Coello, D. 2020.** Caracterización geomecánica del talud de roca en la zona de San Eduardo, Av. Barcelona Sporting Club, Guayaquil, Ecuador. Guayaquil. [en línea]. Recuperado en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49997>
- Dávila, J. 2011.** Diccionario geológico. Callao: Arth Grouting S.A.C. [en línea]. Recuperado en: https://www.academia.edu/4059077/DICCIONARIO_GEOLOGICO
- Deere, D. U.; Deere, D. W. 1988.** The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. Ohio. [en línea]. Recuperado en: [https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20\(RQD\)%20in%20Practice.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20(RQD)%20in%20Practice.pdf)
- González de Vallejo, L. 2004.** Ingeniería geológica. Madrid. [en línea]. Recuperado en: https://www.academia.edu/50773034/INGENIERIA_GEOLOGICA_GONZALES_DE_VALLEJO
- Hoek-Brown. 2018.** El criterio de falla Hoek-Brown y GSI – edición 2018. [en línea].
- Hoek, E.; Carranza, C.; Corkum, B. 2002.** El criterio de rotura de Hoek-Brown – Edición 2002. Minnesota. [en línea]. Recuperado en: https://www.researchgate.net/publication/255644086_El_criterio_de_rotura_de_Hoek-Brown_-_Edicion_2002_Hoek-Brown_failure_criterion_-_2002_Edition
- Hoek, E.; Carter, T.; Diedrichs, M. 2013.** Quantification of the Geological Strength Index Chart. San Francisco. [en línea]. Recuperado en: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2013-Quantification-of-the-GSI-Chart.pdf>
- LoadCap. 2014.** User's manual Loadcap – GeoStru Software (español). [en línea]. Recuperado en: https://help.geostru.eu/pdf/Loadcap_ES.pdf
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). 2019.** Norma técnica E.031 diseño sismorresistente. Lima. [en línea]. Recuperado en: <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que->

aprueba-la-norma-tecnica-e031-aislamie-decreto-supremo-n-030-2019-vivienda-1823291-2

- Mucuta, H.; Cartaya, M.; Watson, R. 2020.** Evaluación de estabilidad en taludes del yacimiento Castellano mediante el cálculo del factor de seguridad. Moa. [en línea]. Recuperado en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122020000400441
- Oros, L. 2018.** Estudio geológico-geotécnico para la estabilidad de taludes en el Departamento de Potosí-Bolivia. Potosí. [en línea]. Recuperado en: <https://revistaingenieria.org/index.php/revistaingenieria/article/view/25>
- Rivasplata, A. 2019.** Determinación de la inestabilidad de taludes en las zonas críticas en la carretera Celendín – Balsas. Cajamarca. [en línea]. Recuperado en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3023>
- Rivera, N. 2022.** Estabilidad de taludes en la carretera Cruz Blanca – Choten, Cajamarca. Huancayo. [en línea]. Recuperado en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8700>
- Senddy, M. 2019.** Determinación geomecánica de taludes en zonas críticas en la carretera San Juan – Huacraruco entre los kilómetros 3+000 – 6+200. Cajamarca. [en línea]. Recuperado en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3465>
- Suarez, J. 2007.** Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Santander. [en línea]. Recuperado en: <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales/>
- Valdera, A. 2017.** Evaluación geomecánica-geotécnica de la carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, provincia de Chota Cajamarca. Cajamarca. [en línea]. Recuperado en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3449>
- Yovany, C. 2017.** Evaluación geomecánica de los taludes de la carretera Encañada – Celendín en el tramo km. 32+000 – km. 46+000. Cajamarca. [en línea]. Recuperado en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1662>

ANEXO 01.

PLANOS

PLANO 01: PLANO DE UBICACIÓN

PLANO 02: PLANO GEOLÓGICO

PLANO 03: PLANO DE PENDIENTES

PLANO 04: PLANO GEOMECÁNICO – RMR Y GSI

PLANO 05: PLANO DE ANÁLISIS DE FALLA - DIPS

PLANO 06: PLANO DE ESTABILIDAD DE TALUDES - SLIDE