

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



TESIS:

ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE INESTABILIDAD DE TALUDES ENTRE EL
Km.1212+600 Y Km.1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA – SAN MARCOS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

AUTOR:

Bach. ESTRADA TORREL LUIS OMAR

ASESOR:

M.Cs.Ing. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO

CAJAMARCA – PERÚ
2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: LUIS OMAR ESTRADA TORREL

DNI: 70203588

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 INESTABILIDAD DE TALUDES ENTRE EL Km.1212+600 Y
Km.1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA – SAN MARCOS

Fecha de evaluación: 09/10/2025

6. Software antiplagio:

TURNITIN

URKUND (OURIGINAL) (*)

7. Porcentaje de Informe de Similitud: 9%

8. Código Documento: Oide:3117:510631500

9. Resultado de la Evaluación de Similitud:

APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 12/10/2025



FIRMA DEL ASESOR
Roberto Severino Gonzales Yana



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 12/10/2025 20:07:05-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : **ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE INESTABILIDAD DE TALUDES EN EL Km. 1212+600 Y Km. 1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA - SAN MARCOS.**

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

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0681-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 15 de octubre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **treinta y un día del mes de octubre 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. Victor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE INESTABILIDAD DE TALUDES EN EL Km. 1212+600 Y Km. 1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA - SAN MARCOS**, presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica **LUIS OMAR ESTRADA TORREL**, 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 si en forma libre y reservada y la evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 04 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 14 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 15 PTS QUINTuplicado..... (En letras)

En consecuencia, se lo declara **APROBADO** con el calificativo de **QUIJOTE**.
Acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las **12:00 p.m.** 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. Victor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

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

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme brindado una vida llena de alegría y felicidad y por darme la dicha de seguir junto a mi familia.

Así mismo a mi Segunda Casa: Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería, y la gran Escuela de Ingeniería Geológica por haberme brindado los conocimientos y la oportunidad de convertirme en un profesional de la Ingeniería Geológica.

A mi familia por ser mi apoyo y sostén durante todo mi camino, gracias a mi madre que nunca me dejó de confiar, por hacer sacrificios y acompañarme en cada día dándome las fuerzas para cumplir mis metas, a mi tío y hermana por ser fuente de inspiración y haber creído en mí.

A mi asesor el Ing. Roberto Severino Gonzales Yana y a todos mis maestros. Por compartir sus conocimientos, experiencias y recomendaciones profesionales en el campo de la Ingeniería Geológica.

L.O.E.T

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a mi madre María y tío Shefe, por el apoyo inquebrantable y amor incondicional, han sido mi mayor inspiración durante el trayecto de mi vida profesional y personal.

A mi hermana Cristina, tío Wilder, primo Wilder por ser fuentes de motivación y aliento en mi vida académica y profesional. Gracias por su constante respaldo.

A mis amigos y compañeros quienes estuvieron compartiendo experiencias, alegrías y tristezas durante la etapa universitaria y en el camino del presente trabajo de investigación.

L.O.E.T

ÍNDICE

	Pág.
ÍNDICE	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FOTOS.....	xiii
ABREVIATURAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	4
2.1.1. Antecedentes Internacionales	4
2.1.2. Antecedentes Nacionales	5
2.1.3. Antecedentes Locales.....	5
2.2. BASES TEÓRICAS.....	6
2.2.1. Geodinámica.....	6
2.2.2. Nomenclatura de un Talud	9
2.2.3. Mecánica de Rocas.....	10
2.2.4. Clasificación de los Macizos Rocosos.....	11
2.2.5. Criterios de Rotura.....	16
2.2.6. Metodología para el Análisis de Taludes	22
2.2.7. Sismicidad.....	28
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	29

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN	31
3.1.1. Ubicación Geográfica	31
3.1.2. Ubicación Política	31
3.1.3. Accesibilidad	32
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	33
3.2.1. Tipo de Investigación.....	33
3.2.2. Población de Estudio	33
3.2.3. Muestra.....	33
3.2.4. Unidad de análisis	34
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	34
3.3.1. Técnicas de recolección de datos	34
3.3.2. Instrumentos de recolección de datos	34
3.3.3. Procedimiento	35
3.4. CLIMA.....	36
3.5. GEOLOGÍA LOCAL.....	37
3.5.1. Formación Chimú.....	38
3.5.2. Formación Santa	38
3.5.3. Formación Carhuaz.....	39
3.5.4. Formación Farrat	39
3.6. UNIDADES MORFOGENÉTICAS.....	39
3.6.1. Planicies	39
3.6.2. Lomadas.....	40
3.6.3. Laderas	41
3.6.4. Escarpas.....	42
3.7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	43

	Pág.
3.7.1. Estructuras Primarias	44
3.7.2. Estructuras Secundarias	44
3.8. GEOTECNIA.....	46
3.8.1. Estación Geotécnica SM – 01.....	47
3.8.2. Estación Geotécnica SM – 02.....	58
3.8.3. Estación Geotécnica SM – 03.....	68
3.8.4. Estación Geotécnica SM – 04.....	77
3.8.5. Estación Geotécnica SM – 05.....	87
3.8.6. Estación Geotécnica SM – 06.....	96

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO – CINEMÁTICO.....	106
4.2. FACTOR DE SEGURIDAD - SOFTWARE SLIDE V.6.0.....	107
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	109

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES	110
5.2. RECOMENDACIONES	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

ANEXO 01

PLANOS

PLANO N°1:	Plano de Ubicación
PLANO N°2:	Plano de Accesibilidad
PLANO N°3:	Plano MDE
PLANO N°4:	Plano de Unidades Morfogenéticas
PLANO N°5:	Plano Geológico - Estructural
PLANO N°6:	Plano Geotécnico

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: Nomenclatura de taludes y laderas.....	9
Figura 2: Representación esquemática para el conteo de discontinuidades en una línea de muestreo (flexómetro).....	12
Figura 3: Estimación del índice de resistencia geológica GSI en base a descripciones geológicas y visuales del macizo rocoso de Hoek y Brown, 1997.....	13
Figura 4: Envolventes de Mohr-Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales (a) y esfuerzos principales (b). Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envolventes no se producirá rotura.	16
Figura 5: (a) Envolventes de rotura del criterio de Hoek y Brown. (b) Representación de las diferentes condiciones de esfuerzo de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa.	18
Figura 6: Método de las Dovelas o Rebanadas.....	24
Figura 7: Método de Bishop Simplificado.	25
Figura 8: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el Método de Spencer y Morgenstein – Price.....	26
Figura 9: Zonificación sísmica en el Perú.	29
Figura 10: Accesibilidad al área de investigación.....	32
Figura 11: Tendencias climáticas.	37
Figura 12: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-01.....	50
Figura 13: Estación SM-01, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).	51
Figura 14: Estación SM-01, dimensiones del Talud.....	52
Figura 15: Factor de seguridad SM-01 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	53
Figura 16: Factor de seguridad SM-01 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	54
Figura 17: Factor de seguridad SM-01 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	54

Figura 18: Factor de seguridad SM-01 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	55
Figura 19: Factor de seguridad SM-01 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	55
Figura 20: Factor de seguridad SM-01 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	56
Figura 21: Factor de seguridad SM-01 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.....	56
Figura 22: Factor de seguridad SM-01 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	57
Figura 23: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-02.....	60
Figura 24: Estación SM-02, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).	61
Figura 25: Estación SM-02, dimensiones del Talud.....	63
Figura 26: Factor de seguridad SM-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales	64
Figura 27: Factor de seguridad SM-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	64
Figura 28: Factor de seguridad SM-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	65
Figura 29: Factor de seguridad SM-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	65
Figura 30: Factor de seguridad SM-02por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	66
Figura 31: Factor de seguridad SM-02 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	66
Figura 32: Factor de seguridad SM-02 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.....	67
Figura 33: Factor de seguridad SM-02 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	67
Figura 34: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-03.....	70

Figura 35: Estación SM-03, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b)	Pág. 71
Figura 36: Estación SM-03, dimensiones del Talud.....	72
Figura 37: Factor de seguridad SM-03 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	73
Figura 38: Factor de seguridad SM-03 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	73
Figura 39: Factor de seguridad SM-03 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	74
Figura 40: Factor de seguridad SM-03 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	74
Figura 41: Factor de seguridad SM-03 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	75
Figura 42: Factor de seguridad SM-03 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	75
Figura 43: Factor de seguridad SM-03 por método de Gle/Morgenstern- Price en condiciones de Tensiones Totales (Condiciones normales).....	76
Figura 44: Factor de seguridad SM-03 por método de Gle/Morgenstern- Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	76
Figura 45: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-04.....	79
Figura 46: Estación SM-04, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b)	80
Figura 47: Estación SM-04, dimensiones del Talud.....	81
Figura 48: Factor de seguridad SM-04 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	82
Figura 49: Factor de seguridad SM-04 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	83
Figura 50: Factor de seguridad SM-04 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	83
Figura 51: Factor de seguridad SM-04 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	84

	Pág.
Figura 52: Factor de seguridad SM-04 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	84
Figura 53: Factor de seguridad SM-04 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	85
Figura 54: Factor de seguridad SM-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.....	85
Figura 55: Factor de seguridad SM-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	86
Figura 56: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-05.....	89
Figura 57: Estación SM-05, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).	90
Figura 58: Estación SM-05, dimensiones del Talud.....	91
Figura 59: Factor de seguridad SM-05 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	92
Figura 60: Factor de seguridad SM-05 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	92
Figura 61: Factor de seguridad SM-05 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	93
Figura 62: Factor de seguridad SM-05 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	93
Figura 63: Factor de seguridad SM-05 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	94
Figura 64: Factor de seguridad SM-05 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	94
Figura 65: Factor de seguridad SM-05 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.....	95
Figura 66: Factor de seguridad SM-05 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	95
Figura 67: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-06.....	98
Figura 68: Estación SM-06, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).	99

Figura 69: Estación SM-06, dimensiones del Talud.....	100
Figura 70: Factor de seguridad SM-06 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales	101
Figura 71: Factor de seguridad SM-06 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	101
Figura 72: Factor de seguridad SM-06 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.....	102
Figura 73: Factor de seguridad SM-06 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	102
Figura 74: Factor de seguridad SM-06 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	103
Figura 75: Factor de seguridad SM-06 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	103
Figura 76: Factor de seguridad SM-06 por método de Gle/Morgenstern- Price en condiciones de Tensiones Totales.....	104
Figura 77: Factor de seguridad SM-06 por método de Gle/Morgenstern- Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	104
Figura 78: Resultados del Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes	106

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Índice de calidad de la roca.....	12
Tabla 2: Índice de resistencia geológica (GSI).....	14
Tabla 3: Calidad de los macizos rocosos con relación al índice RMR.....	15
Tabla 4: Parámetros de Clasificación y sus valores (RMR89).....	15
Tabla 5: Valores Típicos de c y ϕ para roca sana.....	17
Tabla 6: Guias para estimar el factor de alteración “D”.....	21
Tabla 7: Georreferenciación del área de estudio en Sistema de coordenadas UTM, DATUM WGS-84 – Zona 17S.	31
Tabla 8: Accesibilidad al área de investigación.....	32
Tabla 9: Tipo de Investigación.....	33
Tabla 10: Datos históricos meteorológicos, comprendidos entre 2017 y 2024.....	36
Tabla 11: Unidades Morfogenéticas del trabajo de investigación.....	43
Tabla 12: Asignación de valores para el macizo rocoso, Estación SM- 01.....	49
Tabla 13: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-01.....	53
Tabla 14: Asignación de valores para el macizo rocoso, Estación SM- 02.....	59
Tabla 15: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-02.....	63
Tabla 16: Asignación de valores para el macizo rococo, Estación SM- 03.	69
Tabla 17: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-03.	72
Tabla 18: Asignación de valores para el macizo rococo, Estación SM- 04.	78
Tabla 19: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-04.	82
Tabla 20: Asignación de valores para el macizo rococo, Estación SM- 05.	88
Tabla 21: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-05.	91
Tabla 22: Asignación de valores para el macizo rococo, Estación SM- 06.	97
Tabla 23: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-06.	100
Tabla 24: Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes.....	106

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1: Estratificación en areniscas de la Formación Carhuaz.....	38
Foto 2: Planicie.....	40
Foto 3: Lomada.....	41
Foto 4: Ladera.....	42
Foto 5: Escarpa	43
Foto 6: Pliegue en areniscas de la Formación Chimú.	44
Foto 7: Diaclasas	45
Foto 8: Falla inversa en las areniscas de la Formación Carhuaz.....	46
Foto 9: Geometría del talud SM-01(a). Familias del talud SM-01(b).....	48
Foto 10: Geometría del talud SM-02(a). Familias del talud SM-02(b).....	58
Foto 11: Geometría del talud SM-03(a). Familias del talud SM-03(b).....	68
Foto 12: Geometría del talud SM-04(a). Familias del talud SM-04(b).....	77
Foto 13: Geometría del talud SM-05(a). Familias del talud SM-05(b).....	87
Foto 14: Geometría del talud SM-06(a). Familias del talud SM-06(b).....	96

ABREVIATURAS

c	:	Cohesión
FS	:	Factor de Seguridad
Fm.	:	Formación Geológica
GSI	:	Índice de Resistencia Geológica (Geological Strength Index)
ISRM	:	Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas
Kh	:	Aceleración máxima horizontal
Kv	:	Aceleración máxima vertical
L	:	Longitud del talud (metros)
ND	:	Número de discontinuidades
TT	:	Tensiones Totales
TE + S	:	Tensiones Efectivas + Sismicidad
RMR89	:	Sistema de Clasificación Geomecánica (Rock Mass Rating)
RQD	:	Designación de la Calidad de la Roca (Rock Quality Designation)

RESUMEN

La estabilidad de taludes en carreteras es un factor crítico en la seguridad vial y la conservación de la infraestructura. La presente investigación analiza la inestabilidad geotécnica de los taludes entre los Km. 1212+600 y Km. 1223+400 de la carretera Cajamarca – San Marcos, identificando los factores litológicos, estructurales y morfológicos que inciden en los deslizamientos y desprendimientos de material. Se emplearon metodologías de caracterización geomecánica, análisis cinemático y modelamiento numérico utilizando software especializado como RocData v.4.0, Dips v.7.0 y Slide v.6.0.

Los resultados muestran que la inestabilidad en los taludes está condicionada por la litología predominante de rocas sedimentarias, la presencia de discontinuidades estructurales y la erosión acelerada por eventos climáticos. El análisis del factor de seguridad indicó que varios sectores presentan valores inferiores a los aceptables, evidenciando un alto riesgo de falla. Se proponen estrategias de estabilización que incluyen drenaje, sostenimiento mecánico y rediseño de taludes críticos.

Este estudio contribuye a la optimización del diseño y mantenimiento de infraestructura vial en zonas geológicamente complejas, minimizando riesgos y costos asociados a la inestabilidad de taludes.

Palabras clave: Geotecnia, Estabilidad de Taludes, Análisis Cinemático, Factor de Seguridad, Software Geotécnico, Discontinuidades Estructurales, Carreteras, Mitigación de Riesgos.

ABSTRACT

The stability of road slopes is a critical factor in road safety and infrastructure preservation. This research analyzes the geotechnical instability of the slopes between Km. 1212+600 and Km. 1223+400 of the Cajamarca – San Marcos highway, identifying the lithological, structural, and morphological factors influencing landslides and rockfalls. Geomechanical characterization methodologies, kinematic analysis, and numerical modeling using specialized software such as RocData v.4.0, Dips v.7.0, and Slide v.6.0 were employed.

Results indicate that slope instability is conditioned by predominant sedimentary lithology, the presence of structural discontinuities, and accelerated erosion due to climatic events. The safety factor analysis showed that several sectors have values below acceptable thresholds, revealing a high risk of failure. Stabilization strategies, including drainage, mechanical support, and redesign of critical slopes, are proposed.

This study contributes to optimizing the design and maintenance of road infrastructure in geologically complex areas, minimizing risks and costs associated with slope instability.

Keywords: Geotechnics, Slope Stability, Kinematic Analysis, Safety Factor, Geotechnical Software, Structural Discontinuities, Highways, Risk Mitigation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En los proyectos de infraestructura vial, la evaluación de la estabilidad de taludes es fundamental debido a sus significativas implicaciones en términos de seguridad y costos. Para abordar esta problemática, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las características geológicas y geotécnicas específicas de la zona. Para después emplear modelos matemáticos, junto con análisis estereográficos y estudios cinemáticos. Estas herramientas permiten identificar las áreas más propensas a sufrir deslizamientos o desprendimientos de material, tanto en suelos como en formaciones rocosas.

El área de estudio se encuentra ubicada entre las progresivas Km.1212+600 – Km. 1223+400, de la carretera Cajamarca – San Marcos; donde los taludes muestran problemas de inestabilidad geotécnica, causados por las geoformas, litología y discontinuidades de los macizos rocosos, así como los eventos de erosión y meteorización. Estos factores combinados generan problemas de inestabilidad geotécnica, poniendo en riesgo la seguridad vial y afectando negativamente el comercio y el turismo en la región. El estudio es crucial para desarrollar estrategias de mitigación efectivas que mejoren la seguridad vial y preserven la infraestructura de la carretera. Para ello se utilizarán los siguientes softwares especializados: RocData v.4.0: Para determinar los parámetros físico-mecánicos de las rocas analizadas, Dips v.7.0: Para realizar el análisis cinemático y determinar el tipo de rotura y su probabilidad de ocurrencia, Slide v.6.0: Para calcular el factor de seguridad y ArcGIS 10.8: Para la elaboración de planos temáticos y mapeo geológico.

Para la investigación se plantea la siguiente pregunta ¿Cuál es la inestabilidad geotécnica de taludes en el tramo Km.1212+600 – Km. 1223+400, de la carretera Cajamarca – San Marcos? Como hipótesis se plantea: Las condiciones litomorfoestructurales, específicamente la litología, las discontinuidades estructurales y la morfología del terreno, son los factores determinantes en la inestabilidad geotécnica de los taludes en el tramo comprendido entre los Km.1212+600 – Km.1223+400 de la carretera Cajamarca – San Marcos.

La carretera Cajamarca – San Marcos, en el tramo comprendido entre los Km.1212+600 – Km.1223+400, cercano al distrito de Matará, enfrenta problemas recurrentes de desprendimientos y deslizamientos de rocas, lo que representa un peligro constante para los usuarios debido al alto tránsito. Esta situación pone en riesgo la seguridad de los conductores y la integridad de la infraestructura vial, afectando negativamente el comercio y el turismo local. Por lo tanto, se realizará una investigación geotécnica para analizar y relacionar las variables litomorfoestructurales responsables de esta inestabilidad. Esta investigación es crucial para comprender las causas subyacentes de los deslizamientos y desarrollar estrategias de mitigación efectivas, mejorando así la seguridad vial y preservando la infraestructura de la carretera.

El trabajo de investigación tiene como objetivo principal Determinar la Inestabilidad geotécnica de los macizos rocosos en los taludes entre el Km. 1223+400 – Km. 1212+600, de la carretera Cajamarca – San Marcos, en un estudio descriptivo, correlacional y explicativo. Los objetivos específicos son: Realizar el cartografiado geológico de las unidades litomorfoestructurales; Determinar las propiedades geomecánicas y el comportamiento de los macizos rocosos; Calcular el factor de seguridad de cada talud en función de cada tipo de rotura; Realizar una zonificación de inestabilidad geotécnica de zonas críticas.

La tesis comprende cinco capítulos que se describen a continuación:

Capítulo I. Presenta la Introducción, donde se detalla las características de la zona de investigación, plantea y formula el problema, la hipótesis, la justificación, el alcance y los objetivos generales y específicos.

Capítulo II. Presenta el Marco teórico que consiste en los antecedentes teóricos, las bases teóricas y la definición de términos básicos.

Capítulo III. Presenta los Materiales y Métodos que contiene la ubicación de la investigación, el procedimiento, definición de variables, técnicas de recolección de datos, equipos e instrumentos de recolección de datos y procesamiento de la información; marco geológico, conteniendo la estratigrafía, geología estructural, unidades morfogenéticas y el marco geotécnico, con sus respectivas estaciones en taludes.

Capítulo IV. Presenta el Análisis y Discusión de resultados que contiene el análisis de resultados y la contrastación de la hipótesis.

Capítulo V. Presenta las Conclusiones y Recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Díaz (2017). En su trabajo de grado Caracterización Geomecánica Del Macizo Rocosos Presente En El Bloque 5 Del Sinclinal La Jagua, La Jagua De Ibirico - Cesar, logró determinar que la correlación entre los resultados de los ensayos de carga puntual y del registro sónico a compresión simple es un gran aporte para la empresa debido a que permite determinar valores de resistencia de las rocas en forma rápida y confiable sin tener la necesidad de realizar ensayos de campo o de laboratorio.

Hurtado (2009). En la presentación de su investigación Modelo para la estabilización de taludes en la carretera Selva Alegre – Sanguangal que permita disminuir costos de mantenimiento, nos muestra que disminuir costos de mantenimiento, determina la inestabilidad de taludes teniendo en función de factores condicionantes y desencadenantes para el movimiento de masas, ayudado con la geometría de los taludes analizados, determinando así su factor de seguridad. Además, propone sistemas de estabilización como medidas de corrección para taludes inestables.

Ramírez (2015). En su trabajo llamado Planeación estratégica para la estabilidad de taludes en cortes de carreteras, fundamentada en el análisis de riesgos, integra los principios de la Planeación Estratégica y el Análisis de Riesgos. Propone una metodología para evaluar el nivel de riesgo de deslizamientos en los taludes de carreteras. Esta metodología permite prever las medidas de estabilización necesarias para mitigar el riesgo.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Domínguez (2004). En su Investigación Geológica – Geotécnica de los casos especiales en la carretera Corral Quemado – Pedro Ruiz Dpto. Amazonas. Analiza los problemas geodinámicos y geotécnicos de los sectores críticos de la carretera en mención logrando determinar modelos tipos, los que han sido estudiados minuciosamente, con el objetivo de proponer alternativas de solución a las zonas críticas y así puedan ser usadas como base o ejemplo para estudios en lugares o regiones que presenten condiciones y características similares.

Camargo (2017). Presenta en su Estudio geológico - geotécnico de detalle del km. 484 y 496 del ONP (Oleoducto Nor Peruano), para el diseño de obras de estabilización y/o mitigación a nivel de ingeniería básica, provincia de Bagua - departamento de Amazonas. Donde se investiga y analiza la problemática geodinámica de las laderas del Km. 484 y Km. 496 del ONP, describiendo así el peligro activo y/o potencial de la estabilidad de las laderas del tramo del oleoducto en mención, con el fin de plantear posibles soluciones para mitigar el peligro latente de inestabilidad en la zona.

Iberico (2015). Aplicó en su tesis llamada, Estabilización y recuperación de taludes en carreteras, caso “IIRSA Norte Tramo N°1 km 45+690 – km 45+830”; la teoría a un sector inestable real que afecta una carretera en la selva norte del Perú. Se realizaron estudios geotécnicos mediante ensayos de laboratorio y mapeo geológico. El objetivo era diagnosticar el tipo de falla y proyectar obras para estabilizar el talud y asegurar la carretera.

2.1.3. Antecedentes Locales

Rodríguez (2016). En su investigación denominada Método de Investigación Geológico-Geotécnico para el Análisis de Inestabilidad de Laderas por Deslizamientos Zona Ronquillo-Corisorgona, se analiza la inestabilidad de las laderas asociadas a sus factores internos, a través del comportamiento geoestructural, geomorfológico, geodinámico y geomecánico de los macizos rocosos de las unidades geológicas, con el fin de realizar el modelo geológico – geotécnico operacional y conceptual de la inestabilidad de laderas.

Montoya (2014). En su investigación Evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán, analiza el comportamiento litomorfoestructural, identifica los factores que controlan y propician las condiciones geomecánicas, con el objetivo de conocer las características geotécnicas de los taludes en la carretera Cruz Blanca – El Gavilán.

Goicochea & Vasquez (2021). En su estudio geomecánico para el diseño y estabilidad del talud "Chulucana" de la progresiva 1213+000 al 1213+500 carretera San Marcos, Cajamarca 2020, plantearon realizar un estudio técnico para estabilizar y evitar deslizamientos no solo en el talud "Chulucana" sino también a lo largo de la carretera. Además, identificaron sectores con potencial desarrollo de movimientos en masa (falla planar, en cuña o por vuelco).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Geodinámica

La geodinámica hace referencia a todos los movimientos que experimenta la Tierra desde sus inicios, tanto aquellos que se generan por la interacción de la hidrosfera y/o atmósfera sobre la corteza terrestre. (Avalos, 2017)

La metodología para la evaluación geodinámica ayuda a comprender como ocurren los eventos geológicos, cuales son las causas y factores que los generan, las condiciones en que se desarrollan y, por último, sus efectos sobre el globo terrestre.

La teoría relacionada al presente trabajo de investigación, toma relevancia en la geodinámica externa, la cual señala (Gómez, 2017), “se apoya en otras disciplinas como la geomorfología, meteorología, estratigrafía, etc., que permiten conocer todos los factores que participan en el desarrollo de los eventos geodinámicos”.

Geodinámica Interna

El territorio peruano se encuentra sometido a una continua actividad sísmica, debido a la interacción de la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca considerada como la primera fuente sismogénica en el Perú, generando los eventos de mayor magnitud conocidos hasta el presente. La segunda fuente, la conforma la zona continental, cuya deformación ha dado origen a la formación de fallas de diversas longitudes con la consecuente ocurrencia de sismos de magnitudes menores. (Modificado de Cahill & Isacks, 1992)

Geodinámica Externa

Estudia la acción de los procesos exógenos sobre la superficie de la Tierra, donde intervienen diversos factores como las lluvias, el viento, entre otros; éstos originan la destrucción y el modelamiento del relieve. Entre ellas, las precipitaciones pluviales son consideradas uno de los agentes con mayor incidencia en la geodinámica del territorio, pues constituyen el principal factor detonante de los movimientos en masa (MM) tales como: Reptación, deslizamientos, derrumbes y caídas de rocas; los cuales a su vez afectan la seguridad física de los centros poblados donde ocurren este tipo de eventos. (Herrera et al., 2015)

Agentes Geodinámicos

A continuación, se describen los principales agentes geodinámicos (Medina, 1991):

- **El Agua:** Agente geodinámico principal, su acción modeladora de la superficie es casi universal. Protagonista en casi todas las etapas o fases de los ciclos de erosión y sedimentación tales como: meteorización, remoción de materiales rocosos y en la acumulación de los sedimentos que casi siempre se realiza en ambientes acuosos.
- **El Sol:** Similar al agua interviene en todos los procesos que ocurren en la Tierra, mediante las variaciones de temperatura, influye en el comportamiento del agua y viento, influenciando cambios en el estado o resistencia de los cuerpos (dilatación, contracción y ruptura).

- **La Gravedad:** La fuerza de atracción gravitacional de la Tierra es un agente inherente a la dinámica de ésta y está presente en todos los procesos y fenómenos que tienen lugar en superficie; su acción es más evidente en los fenómenos de remoción en masa, facilita la caída de los cuerpos.
- **El Viento:** Ejerce una acción de movilización o transporte y de erosión. Se produce en toda la extensión de los desiertos, en regiones de clima extremadamente seco donde existe muy poca vegetación y en regiones tropicales, acompañado por precipitaciones pluviales a modo de tormentas.
- **Los Organismos Vivos:** La actividad que realizan los seres orgánicos sobre la superficie terrestre, casi siempre ha pasado desapercibida. Hoy en día no se puede desconocer la importante movilización de materiales y el modelado que resulta de dicha acción, desde los seres unicelulares hasta los más evolucionados como el hombre.

Todas estas actividades crean condiciones de desequilibrio que aceleran el desarrollo de fenómenos geodinámicos.

Factores Geodinámicos

Los factores que causan inestabilidad han sido clasificados en dos tipos:

Determinantes y desencadenantes. Los factores desencadenantes controlan la actividad en el tiempo, y los factores determinantes o condicionantes la controlan en el espacio. Los factores determinantes son aquellos que condicionan la estabilidad sin que ésta se inicie. Los factores determinantes son intrínsecos a los materiales naturales.

- **Factores Determinantes (condicionantes)**

Son factores propios del ámbito geográfico de estudio, el cual contribuye de manera favorable o no al desarrollo del fenómeno de origen natural, así como su distribución espacial. (Medina, 1991)

- **Factores Desencadenantes (externos)**

Son aquellos que disparan o detonan la inestabilidad en el talud. Una causa desencadenante pequeña puede ser suficiente para provocar la inestabilidad. (Medina, 1991)

En el territorio peruano, según (PREVAED, 2024) los fenómenos de geodinámica externa de mayor ocurrencia son los movimientos en masa (MM), teniendo como agente desencadenante y principal a las precipitaciones.

2.2.2. Nomenclatura de un Talud

Un talud es una masa de tierra que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 1).

Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas. (Suarez J. , 1998)

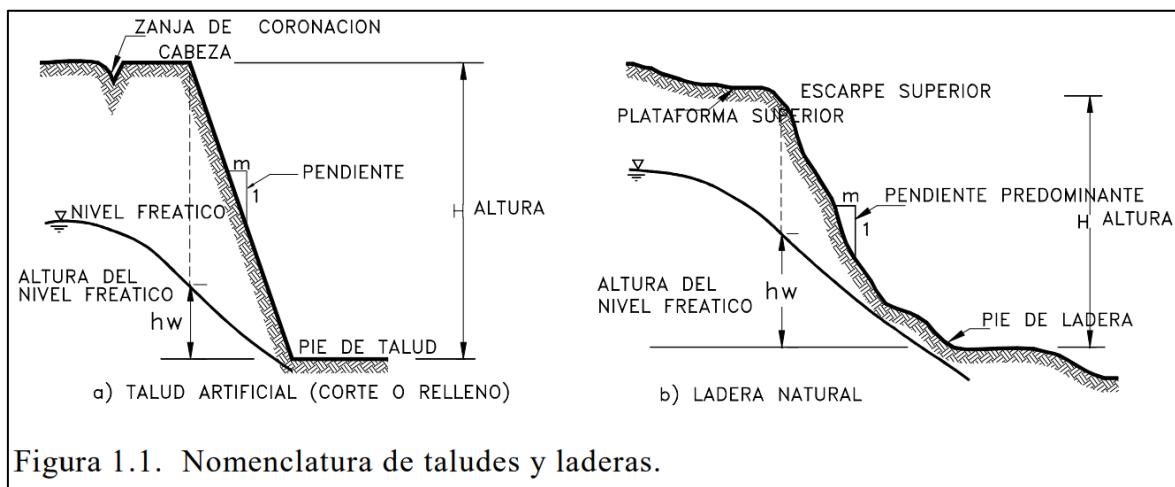


Figura 1.1. Nomenclatura de taludes y laderas.

Figura 1: Nomenclatura de taludes y laderas.

Fuente: (Suarez J. , 1998)

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

- Altura Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- Pie Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- Cabeza o escarpe Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- Altura de nivel freático Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- Pendiente Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/l, en la cual “m” es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. (Suarez J. , 1998)

2.2.3. Mecánica de Rocas

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

Las masas rocosas aparecen en la mayoría afectadas por las discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de matriz rocosa o roca intacta constituyendo en conjunto los macizos rocosos los cuales son objeto de estudio de la mecánica de rocas, pero principalmente los planos de discontinuidad son los que determinan el carácter diferencial de esta disciplina respecto a la disciplina de la mecánica de suelos.

El objetivo de la mecánica de rocas es conocer y predecir el comportamiento de los materiales rocosos ante la actuación de las fuerzas internas y externas que se ejercen sobre ellos. Cuando se excava un macizo rocoso o se construyen estructuras sobre las rocas se modifican las condiciones iniciales del medio rocoso, el cual responde a estos cambios deformándose y/o rompiéndose. (González de Vallejo et al., 2002).

2.2.4. Clasificación de los Macizos Rocosos

Las clasificaciones geomecánica de macizos rocosos tienen como objetivo evaluar sus características para determinar de forma cuantitativa y su calidad. El término macizo rocoso

está referido al conjunto de uno o varios tipos de rocas con los diferentes tipos de discontinuidades que se encuentran en esta. Su caracterización requiere del conocimiento de los siguientes parámetros:

- Resistencia y comportamiento de macizo rocoso.
- Familias de discontinuidades presentes.
- Espaciado de los planos de discontinuidad y fracturación del macizo rocoso.
- Condición de las discontinuidades como su longitud, abertura, rugosidad, relleno y alteración.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Tensiones in situ, naturales o inducidas.
- Alteraciones producidas por el macizo rocoso.

Se tiene 3 clasificaciones geomecánicas, resaltando en este trabajo de investigación: RMR de 1989 denominado Rock Mass Rating (Clasificación del Macizo Rocoso), la clasificación RQD (Índice de Calidad de Roca) realizada por Deere y la clasificación GSI (Índice Geológico de Resistencia) desarrolladas por Hoek y Brown (1997).

Índice de Calidad de la Roca (RQD)

Desarrollada por Deere en 1967, el cual propuso un índice cuantitativo porcentual de la calidad de la roca, basado en la recuperación de núcleos con perforación de diamante (Hoek y Brown, 1995). Sin embargo, cuando no se dispone de núcleos de perforación, el RDQ puede ser estimado a partir de una línea de muestreo, como se muestra en la siguiente figura, donde se puede obtener el promedio del espaciado de las discontinuidades o juntas (número de discontinuidades dividida para la longitud de la línea de muestreo) (Gavilanes & Andrade, 2004).

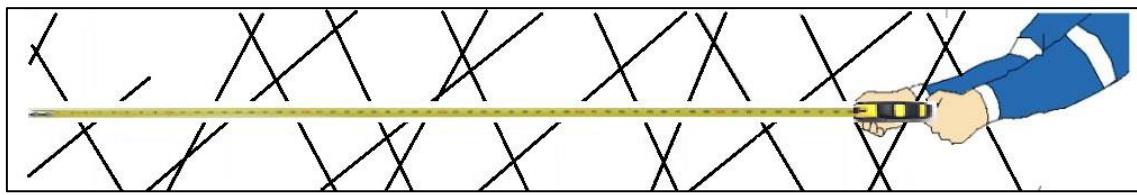


Figura 2: Representación esquemática para el conteo de discontinuidades en una línea de muestreo (flexómetro).

Fuente: (Montoya, 2014)

Calculándose con la siguiente ecuación.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0,1\lambda + 1)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ de discontinuidades}}{\text{longitud (m.)}}$$

Tabla 1: Índice de calidad de la roca.

RQD (%)	Calidad de la Roca
<25	Muy Pobre
25 a 50	Pobre
50 a 75	Regular
75 a 90	Buena
90 a 100	Excelente

Fuente: Tomado de (Gavilanes & Andrade, 2004)

Índice de Resistencia Geológica (GSI)

Propuesto y desarrollado por Hoek y Brown (1997). El GSI es un índice de calidad geomecánica para macizos rocosos y se basa en la identificación y clasificación en campo de dos características fundamentales: la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades.

La estimación del valor GSI, se realiza a partir de inspecciones visuales del macizo rocoso expuesto en la superficie, como afloramientos, taludes y túneles, mediante el uso de la figura 3, basada en descripciones geológicas del macizo rocoso, propuesta por Hoek y Brown (1997).

La resistencia de la matriz rocosa isótropa se puede evaluar mediante los criterios de rotura de Mohr Coulomb y de Hoek y Brown. La principal diferencia entre ambos es que el primero es un criterio lineal y el segundo no lineal, más adecuado al comportamiento mecánico real de las rocas. A lo largo de las últimas décadas otros criterios de rotura han sido desarrollados por diferentes autores, generalmente con menor difusión y aplicación.

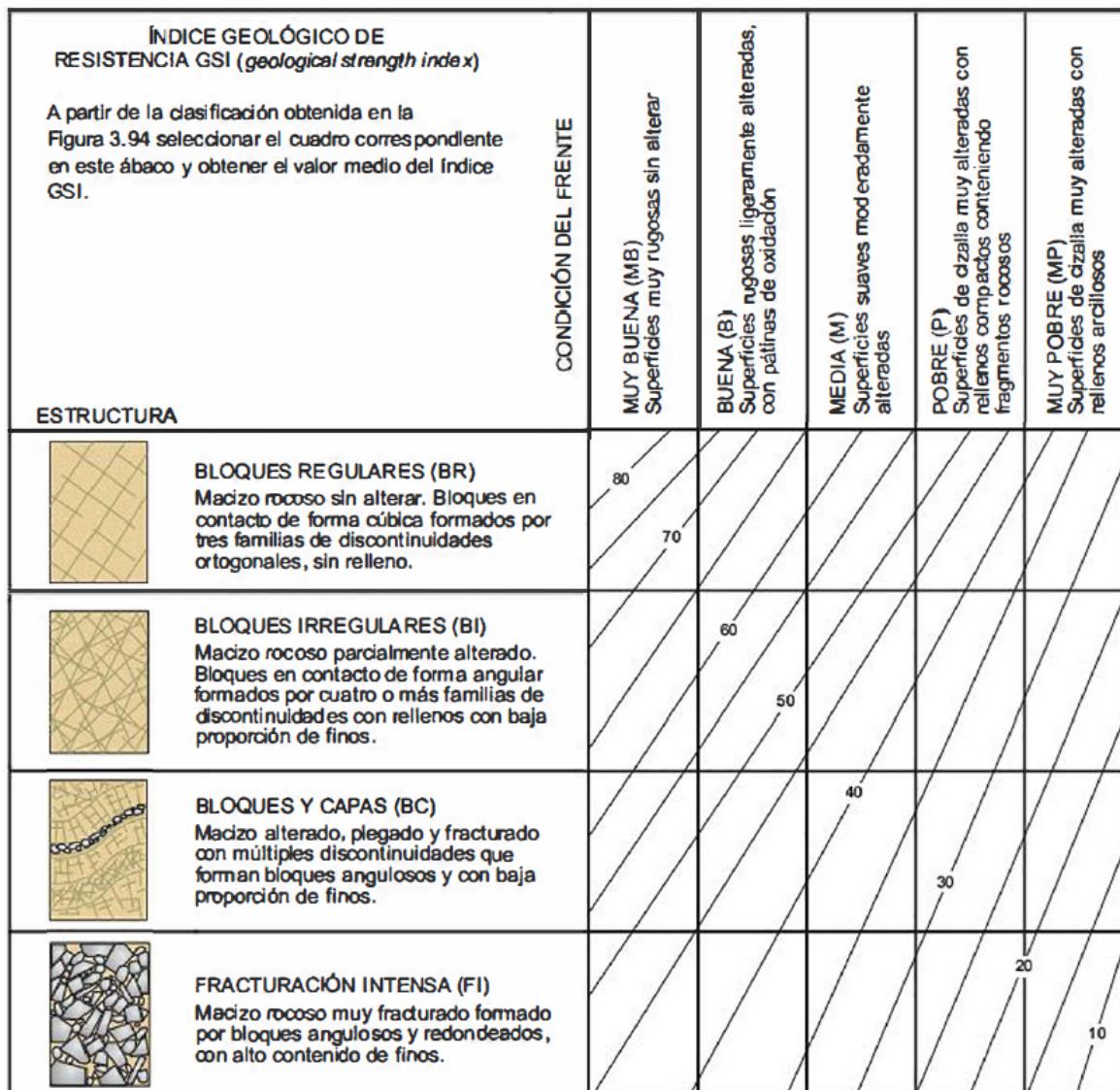


Figura 3: Estimación del índice de resistencia geológica GSI en base a descripciones geológicas y visuales del macizo rocoso de Hoek y Brown, 1997.

Fuente: Obtenido de González de Vallejo et al., 2004.

Por otro lado, el GSI puede ser estimado en relación al RMR89, conforme al criterio de Hoek et al., 1995, si $RMR89 \geq 23$, entonces:

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

Teniendo en cuenta las siguientes condiciones para el macizo rocoso:

- Agua subterránea (condición general: totalmente seco): 15
- Ajuste por orientación de las diaclasas (muy favorable): 0

Tabla 2: Índice de resistencia geológica (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	81- 100

Fuente: Tomado de Hoek (2002).

Sistema de Clasificación Geomecánica (RMR89: Rock Mass Rating, 1989)

Clasificación Geomecánica fue desarrollado inicialmente por Bieniawski (1976). El sistema ha evolucionado debido principalmente a una mejor comprensión de la importancia de los diferentes parámetros y una mayor experiencia en la dirección de los cambios en las calificaciones de los parámetros (Bieniawski, 1989).

Este sistema utiliza cinco parámetros: resistencia a la compresión uniaxial de material de roca, grado de fracturamiento (RQD), el espaciamiento de discontinuidades, condición de discontinuidades, las condiciones de agua subterránea; la estimación de RMR89 es la suma de las puntuaciones totales de cada uno de los arriba mencionados cinco parámetros (Bieniawski, 1989).

1. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
2. Grado de fracturación en términos del RQD.
3. Espaciado de las discontinuidades.

4. Condiciones de las discontinuidades.

5. Condiciones hidrogeológicas.

$$\text{RMR}_{89} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Tabla 3: Calidad de los macizos rocosos con relación al índice RMR.

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN (RMR)	COHESIÓN	ÁNGULO DE ROZAMIETO
I	Muy Buena	100 – 81	>4 Kg/cm ²	>45°
II	Buena	80 – 61	3 – 4 Kg/cm ²	35° - 45°
III	Media	60 – 41	2 – 3 Kg/cm ²	35° - 45°
IV	Mala	40 – 21	1 – 2 Kg/cm ²	35° - 45°
V	Muy Mala	<20	<1 Kg/cm ²	<15°

Fuente: Obtenido de González de Vallejo et al., 2002.

Tabla 4: Parámetros de Clasificación y sus valores (RMR89).

A. PARAMETROS DE CLASIFICACIÓN Y SUS VALORES							
Parámetros		Rango de Valores					
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de carga puntual	> 10Mpa	4 – 10 Mpa	2 – 4 Mpa	1 – 2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial
	Resistencia Compresiva Uniaxial	> 250Mpa	100 – 250 Mpa	50 – 100 Mpa	25 – 50 Mpa	5 – 25 Mpa	1 – 5 Mpa < 1 Mpa
	Valoración	15	12	7	4	2	1 0
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%	
	Valoración	20	17	13	8	3	
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6 – 2m	0.2 – 0.6m	60 - 200mm	< 60 mm	
	Valoración	20	15	10	8	5	
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo < 5mm de espesor o apertura de 1 – 5mm Juntas continuas	Panizo suave > 5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas
	Valoración	30	25	20	10	0	
	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125	
5	Agua Subterránea	Presión de agua / o principal máximo	0	< 0.1	01 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5
	Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo	
	Valoración	15	10	7	4	0	

Fuente: Tomado de González de Vallejo et al., 2004.

2.2.5. Criterios de Rotura

Criterio de Mohr-Coulomb

Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura mediante la expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg}\phi$$

Donde:

- τ y σ_n son las tensiones tangencial y normal sobre el plano de rotura.
- c y ϕ son la cohesión y ángulo de rozamiento de la matriz rocosa.

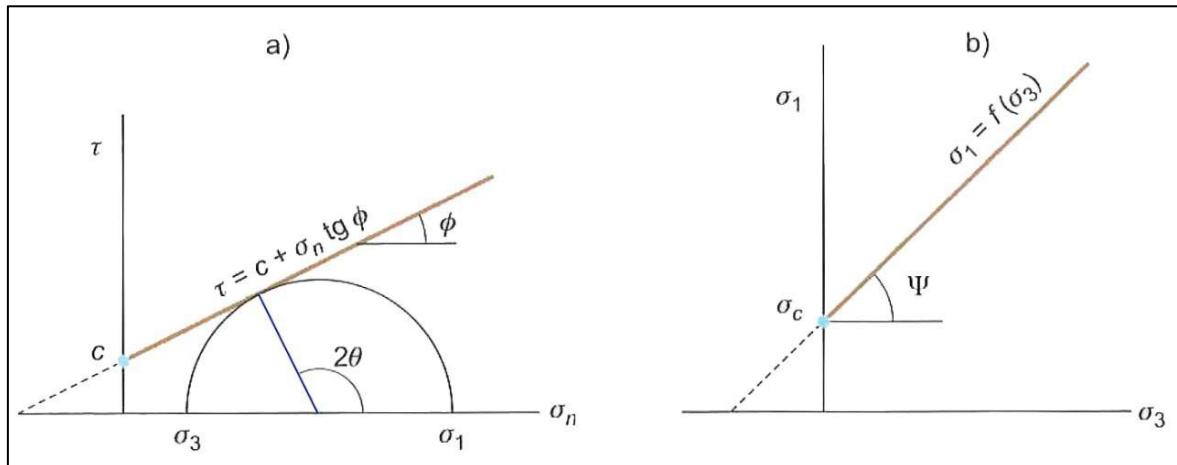


Figura 4: Envolventes de Mohr-Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales (a) y esfuerzos principales (b). Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envolventes no se producirá rotura.

Fuente: Obtenido de González de Vallejo et al., 2002.

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3[\operatorname{sen}2\theta + \operatorname{tg}\phi(1 - \cos2\theta)]}{\operatorname{sen}2\theta - \operatorname{tg}\phi(1 + \cos2\theta)}$$

Permitiendo obtener la resistencia en cualquier plano definido por θ . Para el plano crítico de rotura, $\theta = 45^\circ + \phi/2$, la expresión anterior tomará la forma:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos\phi + \sigma_3(1 + \operatorname{sen}\phi)}{(1 - \operatorname{sen}\phi)}$$

Si se da la condición será la resistencia a la compresión simple de la roca. El criterio también proporciona el valor de la resistencia a tracción:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos\phi}{1 + \operatorname{sen}\phi}$$

No obstante, si se utiliza este criterio lineal de rotura para evaluar la resistencia de la matriz rocosa, se pueden adoptar las siguientes recomendaciones:

- Suponer que el valor de la cohesión es un valor próximo al 10% de la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.
- Adoptar un valor del ángulo de rozamiento interno según el nivel de tensiones con el que trabaja, tomado de ensayos específicos o de tablas (Tabla 5).

Tabla 5: Valores Típicos de c y ϕ para roca sana.

Roca	Cohesión c (kp/cm ³)	Ángulo de fricción básico ϕ
Andesita	280	45°
Arenisca	80 – 350	30° – 50°
Basalto	200 – 600	48° – 55°
Caliza	50 – 400	35° – 50°
Caliza Margosa	10 – 60	30°
Cuarcita	250 – 700	40° – 55°
Diabasa	900 – 1200	40° – 50°
Diorita	150	50° – 55°
Dolomía	220 – 600	25° – 35°
Esquisto	250	25° – 30°
Gabro	300	35°
Gneiss	150 – 400	30° – 40°
Granito	150 – 500	45° – 58°
Grauvaca	60 – 100	45° – 50°
Mármol	150 – 350	35° – 45
Arcillolita	30 – 350	40° – 60°
Pizarra	100 – 500	40° – 55°
Toba	7	-
Yeso	-	30°

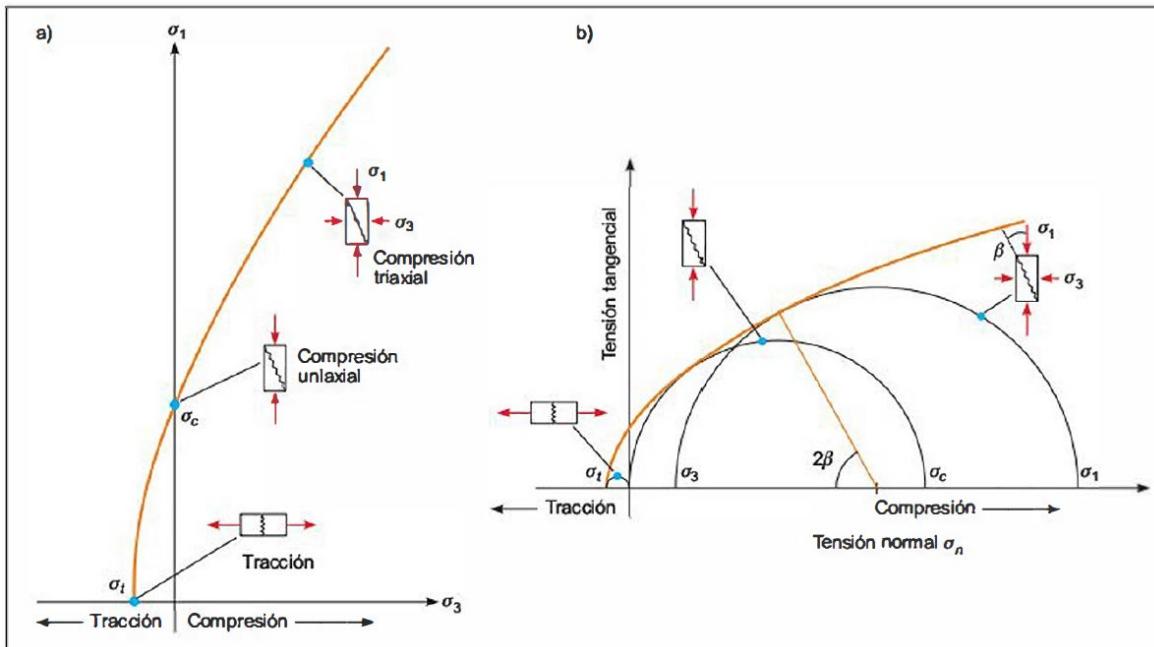
Fuente: Obtenido de González de Vallejo et al., 2004.

Criterio de Hoek y Brown

El criterio de rotura de Hoek y Brown, es un criterio semi empírico que permite estimar la resistencia al corte de roca intacta y de los macizos rocosos. (Hoek et al.,2002)

Para evaluar la resistencia de la matriz rocosa, es más adecuado un criterio no lineal, donde la representación gráfica de la rotura es una curva de tipo cóncavo.

Figura 5: (a) Envolventes de rotura del criterio de Hoek y Brown. (b) Representación de las diferentes condiciones de esfuerzo de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa.



Fuente: Obtenido de González de Vallejo et al., 2002.

Hoek et al (2002) señalan que, “en muchos problemas geotécnicos, en particular, estabilidad de taludes, es más conveniente tratar el criterio original de Hoek-Brown en términos de esfuerzos normales y al corte mas que en términos de esfuerzos principales”, según la ecuación original:

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + \sqrt{m_1 \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s}$$

Donde:

- σ_1' y σ_3' , son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura.
- σ_{ci} , es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto.
- m y s , son las constantes del material, donde $s=1$ para roca intacta.

Este criterio de rotura ha ido evolucionando a lo largo de los años, tal y como señala (Puell, 2004), indicando que la fórmula original ha sufrido ligeras modificaciones, dando lugar al denominado Criterio de Hoek-Brown Generalizado. Donde Hoek et al., 2002, señala que la forma de la curva de la tensión principal o la envolvente de Mohr podría ajustarse por medio de un coeficiente variable, a , en lugar del término de la raíz cuadrada de la ecuación inicial de Hoek y Brown.

Es así que, la relación entre los esfuerzos principales en la rotura para el caso de macizos rocosos obedece la siguiente ecuación:

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

Donde:

- m_b , s , y a son parámetros que dependen de la estructura de las discontinuidades en el macizo rocoso, además, estos parámetros se correlacionan con el GSI.

Matemáticamente se expresan de la siguiente manera:

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

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

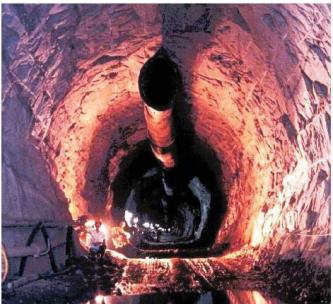
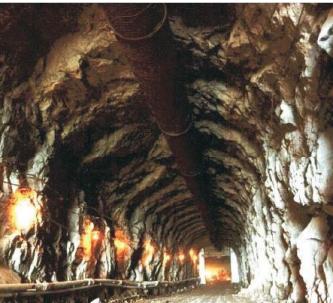
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

Donde:

- mb es un valor reducido de la constante del material mi .
- s y a son constantes del macizo rocoso.
- D es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos muy alterados.

La tabla 6, muestra la guía de estimación para el factor D, a partir de la experiencia y del análisis de varios estudios realizados en taludes, advirtiéndose que los valores aplicados deben ser tomados con cautela.

Tabla 6: Guías para estimar el factor de alteración “D”.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor <i>D</i> sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	<i>D</i> =0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contra bóveda temporal, tal como se muestra en la figura.	<i>D</i> =0 <i>D</i> =0.5 No invertir
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3m. en el macizo circundante.	<i>D</i> =0.8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo, la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.	<i>D</i> =0.7 Buena voladura <i>D</i> =1.0 Mala voladura
	Los taludes en grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blancas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripiado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	<i>D</i> =1.0 Voladura de producción <i>D</i> =0.7 Excavación mecánica

Fuente: Hoek et al (2002).

2.2.6. Metodología para el Análisis de Taludes

Análisis de Inestabilidad

Los análisis de estabilidad de taludes son fundamentales en la ingeniería geotécnica, tanto para el diseño de nuevas excavaciones como para la evaluación y mitigación de inestabilidades existentes.

El factor crítico en estos análisis es la determinación del coeficiente de seguridad (FS) adecuado. Para taludes permanentes, como en infraestructuras viales o minería a cielo abierto, se recomienda un $FS \geq 1.5$, llegando incluso a 2.0 en casos que requieran mayor confiabilidad. En taludes temporales, como en obras civiles de corta duración, se puede considerar un $FS \approx 1.3$, aunque en ciertas circunstancias se admiten valores inferiores, siempre bajo un estricto control geotécnico. (González de Vallejo, 2002)

Estos análisis permiten optimizar la geometría de la excavación y determinar las fuerzas estabilizadoras necesarias para alcanzar el FS requerido. En casos de inestabilidad manifiesta, son cruciales para el diseño de medidas correctivas, como sistemas de drenaje, anclajes o muros de contención. (González de Vallejo, 2002)

La modelación matemática de los taludes es parte de la práctica de la ingeniería geotécnica, con el objetivo de analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales, la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales. (Suarez, 2009)

Factor de Seguridad (FSs)

El Factor de Seguridad se usa para conocer cual es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña.

La resistencia cortante de un suelo consta de dos componentes, la cohesión y la fricción, y se expresa como:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\phi'$$

Dónde:

c' = Cohesión

ϕ' = Ángulo de fricción drenada

σ' = Esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla

Cuando FS_s es igual a 1, el talud está en un estado de falla incipiente. Generalmente, un valor de 1.5 para el de Factor de Seguridad con respecto a la resistencia es aceptable para el diseño de un talud (Das, 2015).

➤ **Métodos de Cálculo para la Estabilidad de Taludes**

• ***Métodos de Equilibrio Límite***

Los métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad de taludes son los más utilizados en la práctica común, debido a su sencillez, y porque el valor del coeficiente de seguridad obtenido no dista demasiado del valor real (Suarez 2009).

Este sistema supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1,0 (Suarez, 2009).

González de Vallejo (2004), señala que se basan en:

1. La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
2. El criterio de rotura de Mohr-Coulumb.
3. La definición de coeficiente de seguridad.

- **Método de las Dovelas o Rebanadas**

Este método, también conocido como el **Método de Equilibrio Límite** (LEM), fue introducido a inicios del siglo XX por Pettersen. Se basa en la discretización de la masa potencial deslizante en secciones verticales llamadas dovelas. Cada dovela es analizada para determinar el equilibrio entre fuerzas y momentos actuantes, lo que permite calcular el **Factor de Seguridad** (FS) del talud. Este método es especialmente útil para superficies de deslizamiento circulares, aunque tiene limitaciones al no considerar interacciones complejas entre las dovelas.

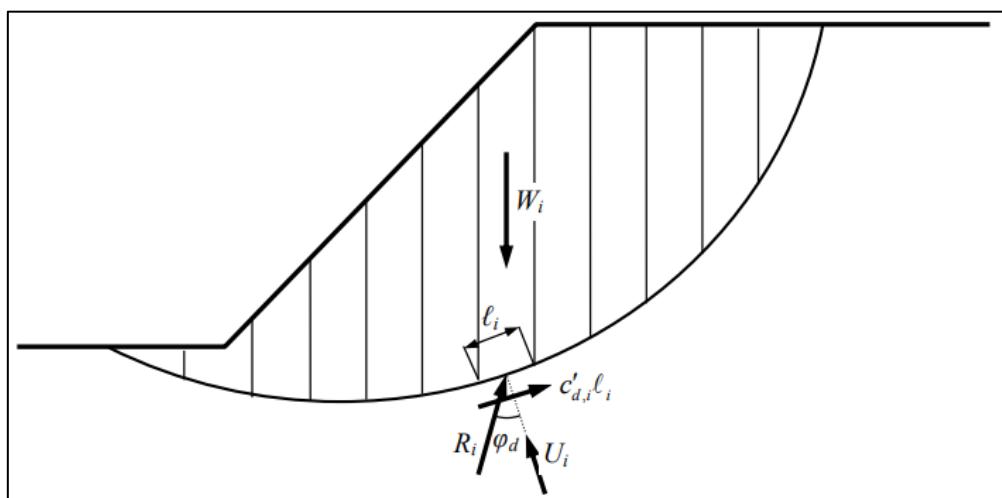


Figura 6: Método de las Dovelas o Rebanadas.

Fuente: (Morgenstern – Price, 1960)

- **Método de Bishop Simplificado**

Bishop halló un método de rebanadas, con las siguientes hipótesis:

1. Se supone una superficie de ruptura circular.
2. La masa deslizante se divide en “n” rebanadas o bloques verticales.
3. Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto el centro del círculo.
4. A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se obtienen las fuerzas N (normales a la superficie de ruptura) y se sustituyen a la ecuación resultante del equilibrio de momentos.
5. El Método de Bishop Simplificado ignora las tensiones tangenciales entre rebanadas. (Figura 7).

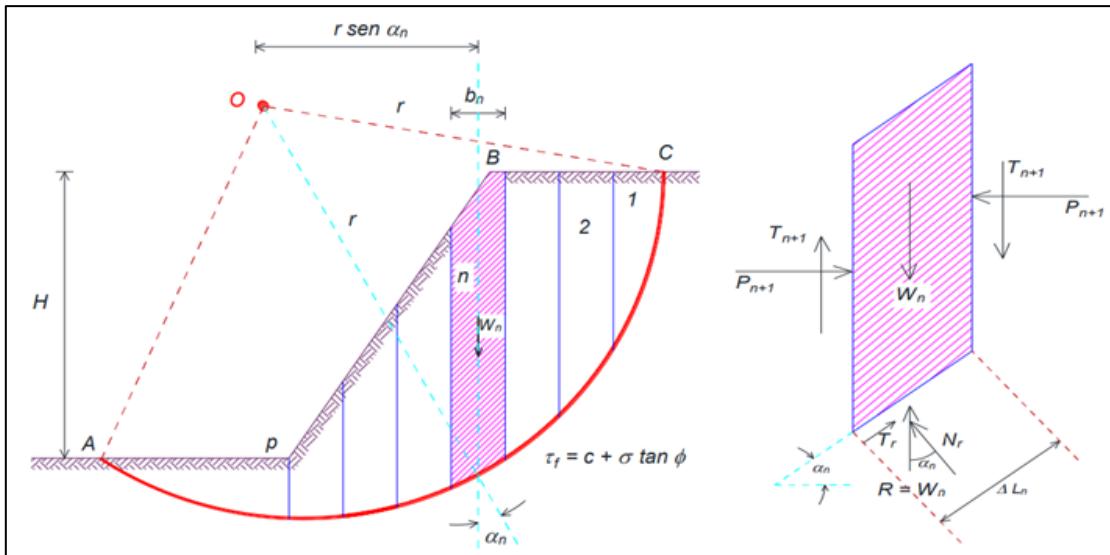


Figura 7: Método de Bishop Simplificado.

Fuente: Obtenido de Vallejo (2004).

Es necesario realizar varias iteraciones para obtener el valor del Factor de Seguridad, y la convergencia acostumbra a determinarse rápidamente. Una vez se obtiene el valor del Factor de Seguridad de la superficie considerada, se supone una segunda superficie circular y se determina un nuevo valor de FS; y así sucesivamente hasta obtener un mínimo. Normalmente, las ecuaciones se programan y se analizan círculos con diferentes radios y centros, hasta que se consigue el que proporciona un valor del Factor de Seguridad mínimo.

$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c\Delta l \cos \alpha + (W - u\Delta l \cos \alpha) \tan \phi}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi)/F} \right]}{\sum W \sin \alpha}$$

Donde:

W: Peso de la dovela.

u: Presión de Poros.

FS: Factor de Seguridad.

c: Cohesión Efectiva.

ϕ : Ángulo de Fricción Efectivo.

α : Ángulo entre la tangente de la base de la dovela y la horizontal.

Δl : Longitud de la base de la Dovela.

- **Método de Spencer**

Inicialmente pensado para el análisis de superficies de rotura circulares, el método de Spencer (1967) puede ser aplicado a superficies no circulares siempre que se adopte uno centro de rotación friccional. En este método se suponen todas las fuerzas entre elementos (Figura 8).

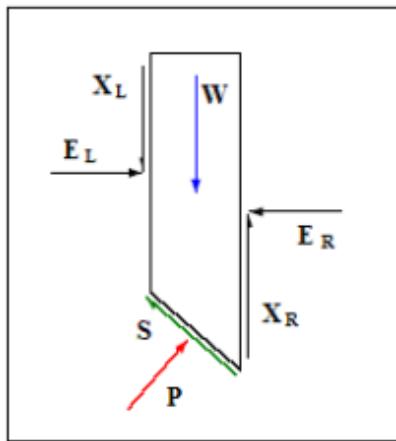


Figura 8: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el Método de Spencer y Morgenstein – Price.

Fuente: (Gamarra, 2017)

También se supone que las fuerzas entre rebanadas tienen una inclinación constante (θ) a lo largo de toda la recta, de forma que:

$$X/E = \tan\theta$$

Donde: X son las fuerzas verticales y E las horizontales. La fuerza normal en la base del elemento será:

$$P = \left[W(E_R - E_L)\tan\theta - \frac{1}{FS} (c'l\sin i - u\tan\varphi'\sin i) \right] / m_i$$

Donde:

$$m_i = \cos i \left(1 + \tan i \frac{\phi'}{F} \right)$$

Donde el FS es el factor de Seguridad definido como la tensión de corte movilizada respecto la disponible; ER y EL son las fuerzas horizontales derecha e izquierda respectivamente, entre los elementos de la rebanada; u es la presión de poro en la superficie de rotura; l es la longitud de la base de la rebanada; i la inclinación de la base del elemento; c' y φ' la cohesión y el ángulo de fricción en la superficie de rotura.

Suponiendo que el ángulo θ es constante para todos los elementos de la vertiente, se pueden hacer ambos, el equilibrio global de momentos y el de fuerzas, de manera que se encuentran dos valores del Factor de Seguridad, el del equilibrio de fuerzas (Ff) y el de momentos (Fm). Es puede encontrar un valor de θ tal que ambos factores de seguridad coincidan, que será el Factor de Seguridad de la vertiente.

- ***Método de Morgenstern – Price (1965)***

El método de análisis desarrollado por Morgenstern y Price (1965) puede ser aplicado tanto a superficies de rotura circulares como no circulares. Es un método parecido al método de Spencer, pero en este caso permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas. Considera que las tensiones y las fuerzas varían continuamente en la superficie, resuelve las componentes normal y paralela a la base para cada elemento formulando ecuaciones de equilibrio de fuerza generales. Supone que existe la siguiente relación entre esta componente vertical y normal:

$$XE = \lambda f(x)$$

Dónde $f(x)$ es la función que varía de forma continua a lo largo de la línea, y λ es un valor escala.

Para una función dada $f(x)$, los valores de λ y F se encuentran de forma que se cumplan los equilibrios globales de Momentos y Fuerzas. De esta forma:

$$F = Fm = Ff$$

Para escoger $f(x)$ se puede hacer considerando la distribución de tensiones normales a los límites de los elementos. En general no tiene que haber tensiones efectivas de tracción y las tensiones de corte deben ser menores a las requeridas por el equilibrio crítico local.

2.2.7. Sismicidad

Para definir las condiciones sísmicas se tomó como referencia la Modificación de la Norma Técnica E.30 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones (en su Capítulo II, Artículo 10: Zonificación), según Resolución Ministerial N°355-2018-Vivienda, publicada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018); donde señala que: “El territorio nacional se considera dividido en cuatro zonas sísmicas (ver Figura 9).

La presente zonificación se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como, en la información neotectónica”.

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento ha realizado la zonificación sísmica del territorio Peruano emitiendo diferentes resoluciones a lo largo de los últimos años siendo la última denominada Resolución ministerial N° 355 – 2018 – Vivienda en donde indica que el territorio nacional se ha dividido en cuatro zonas, la zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica.

El área de estudio se encuentra en la Zona 2, correspondiéndole una aceleración máxima de 0.25, siguiendo la metodología de Rodríguez 2016 el tesista el valor de la aceleración sísmica se ingresó al software Loadcap obteniendo valores de aceleración sísmica horizontal de 0.125 y coeficiente de aceleración sísmica vertical de 0.0625.

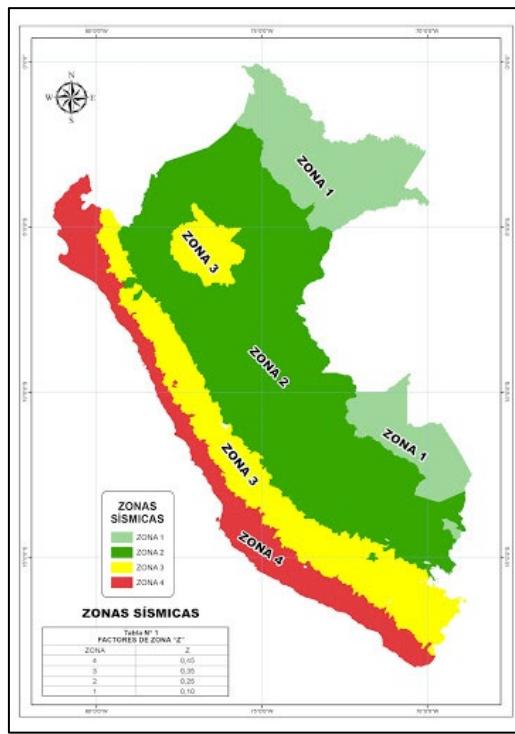


Figura 9: Zonificación sísmica en el Perú.

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Deslizamiento:** Es movimiento de una porción de terreno a través de una superficie de rotura neta con la preservación general de la estructura interna original, que se produce en superficies de rotura o en zonas relativamente delgadas de intensa deformación de corte (Highland y Bobrowsky, 2008).
- **Matriz rocosa:** Es el material rocoso libre de discontinuidades también denominado roca intacta que presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo condicionado por sus características de fábrica y estructura mineralógica (González de Vallejo et al. 2002).
- **Macizo rocoso:** Es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y las discontinuidades de todos los tipos que afectan al material rocoso, en la mecánica se considera un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo (González de Vallejo 2002).

- **Precipitación:** Es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre". Esto incluye fenómenos como lluvia, nieve, granizo y llovizna. (García, 2014).
- **Talud.** Masa de tierra que no es plana, sino que posee pendientes o cambios bruscos de altura. Cuando este se desarrolla en forma natural sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera (Suarez, 2009).
- **Factor de seguridad.** Equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad (Suarez, 2009).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

3.1.1. Ubicación Geográfica

El área de estudio se encuentra delimitada por las progresivas Km.1212+600 y Km.12233+400, de la carretera Cajamarca – San Marcos, se ubica políticamente en el Centro Poblado Cochamarca, provincia de San Marcos y departamento de Cajamarca. Esta área se encuentra en el cuadrángulo 15-g, zona 17S; conformando un tramo de 11Km. + 800m. de longitud, con la siguiente georreferenciación (Ver Plano 01).

Tabla 7: Georreferenciación del área de estudio en Sistema de coordenadas UTM, DATUM WGS-84 – Zona 17S.

Progresiva (Km.)	Coordenada		Cota (m.s.n.m.)
	Este	Norte	
Inicio (Km. 1223+400):	807625 E	9193735 S	2841 m.s.n.m.
Final (Km. 1212+600):	810980 E	9190178 S	2416 m.s.n.m.

3.1.2. Ubicación Política

Políticamente el área de estudio de La carretera Cajamarca – San Marcos se encuentra entre el Centro Poblado Cochamarca y el Centro Poblado de San Marcos, dentro de la provincia de San Marcos, departamento de Cajamarca.

3.1.3. Accesibilidad

El acceso al tramo de investigación, se realiza por la carretera asfaltada Cajamarca – San Marcos, en un tiempo estimado de 80 minutos, teniendo como punto de partida la ciudad de Cajamarca en carro particular (Ver Figura 10).

Tabla 8: Accesibilidad al área de investigación.

Ruta Terrestre	Distancia	Estado	Tiempo
Cajamarca – Matara	66.3 Km	Asfaltada	47 min
Matara – San Marcos	8.4 Km	Asfaltada	28 min
(km.1212+600)			

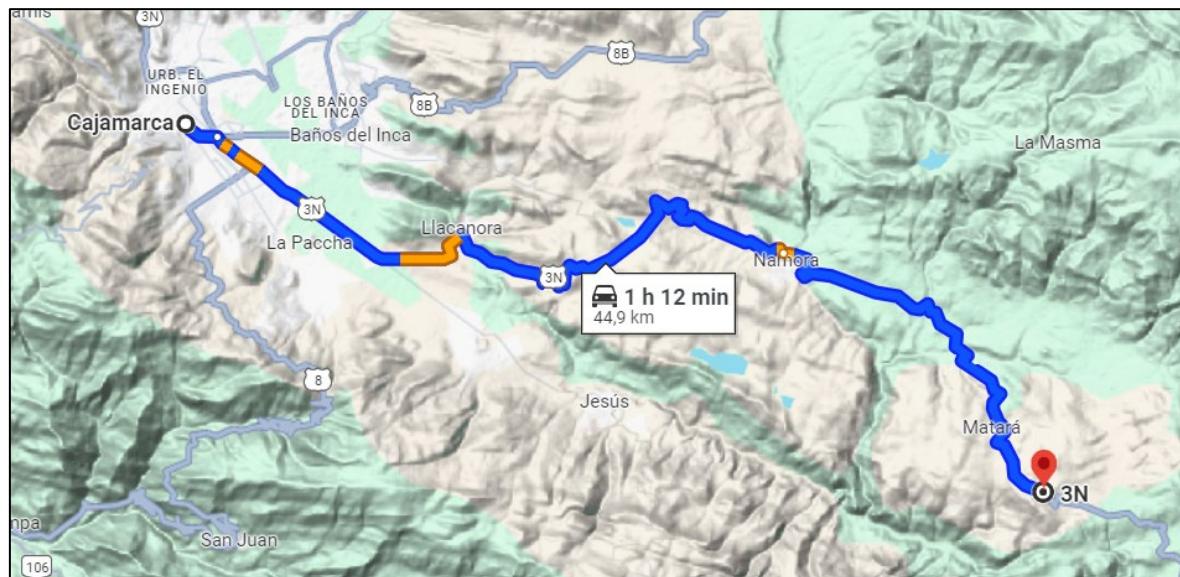


Figura 10: Accesibilidad al área de investigación.

Fuente: Modificado de Google Maps (2024).

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Tipo de Investigación

El proyecto de investigación se basó en describir, relacionar y explicar los factores que intervienen para generar la inestabilidad natural en los taludes, usando métodos tanto de valoración como de evaluación para cada circunstancia; causando que la investigación sea descriptiva, correlacional y explicativa; de manera no experimental, debido a que no se manipulan las variables. Así mismo, es transversal ya que los datos se recogen en un tiempo y lugar determinados.

Tabla 9: Tipo de Investigación.

Aplicada
Según su tipo Porque se basa en los hallazgos, descubrimientos y soluciones que se planteó en el objetivo de estudio.
Descriptiva
Según el nivel Se enfoca en obtener información detallada y precisa sobre la inestabilidad de los taludes de la carretera.
No Experimental
Según el diseño No se controlan ni manipulan las variables del estudio. Se utilizarán las variables como se encuentren en la naturaleza.
Cuantitativa/Cualitativa
Según su naturaleza La naturaleza de la investigación es cuantitativa/cualitativa considerando los valores de las discontinuidades y de la matriz rocosa de cada talud.
Transversal
Según el periodo Debido a que se llevará a cabo durante un periodo de tiempo determinado.

Fuente: Modificado de Supo (2016).

3.2.2. Población de Estudio

Los taludes comprendidos entre el Km.12233+400 y Km.1212+600, de la carretera Cajamarca – San Marcos, de una longitud total de 11.5 km.

3.2.3. Muestra

Estaciones geotécnicas, desde la progresiva Km.12233+400 y Km.1212+600, de la carretera Cajamarca – San Marcos.

3.2.4. Unidad de análisis

Son las variables: Macizo rocoso, litología, discontinuidades, geoformas y fallas.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. Técnicas de recolección de datos

Para el desarrollo del proyecto de investigación se utilizaron las siguientes técnicas:

- Búsqueda Bibliográfica, como informes, bases teóricas, estudios, etc. En relación con el problema del trabajo de investigación.
- Recopilación de información de campo (in – situ), a través de la observación y descripción in situ de cada estación para la caracterización geomecánica.
- Ensayos Geomecánicos (in – situ), se hicieron usando la picota para golpear la superficie de roca intacta en los macizos rocosos.
- Procesamiento de Datos, a través de softwares como: RocData v.4.0 (hallar parámetros físico-mecánicos de las rocas analizadas), Dips v.7.0 (análisis cinemático para hallar el tipo de rotura planar y cuña y su probabilidad de susceptibilidad), Slide v.6.0 (permitió calcular el factor de seguridad considerando los métodos de equilibrio límite) y ArcGis (elaboración de planos temáticos).

3.3.2. Instrumentos de recolección de datos

- Registro Geológico – Geotécnico (formato de campo) de Rodríguez y tablas geomecánicas, utilizado para recopilación de datos específicos en zonas de interés.
- Planos base que sirvieron para contrastar la información panorámica, topográfica y geológica de la zona de investigación.
- Libreta de campo, utilizada para registro de datos.
- Lapiceros y lápices, utilizado como herramientas para escribir y dibujar datos observados en campo.
- Cámara fotográfica de 20Mpx, utilizada para evidenciar las características geoestructurales y geotécnicas de campo.

- GPS Garmin Oregon 700, utilizado para la toma de coordenadas UTM (latitud y longitud) y cotas, en campo.
- Picota de geólogo, se utilizó para la extracción de muestras y ensayos in situ mediante golpeo sobre la matriz rocosa a fin de determinar la resistencia de la compresión uniaxial.
- Brújula geotécnica, usada para la medición de datos orientación y buzamiento.
- Lupas 20x, utilizado para el reconocimiento de minerales y rocas.
- Flexómetro de 5m., usado para la medición de las dimensiones del talud, así como, para medición de algunos datos geomecánicos (espaciado y persistencia de las discontinuidades).
- Lápiz rayador, utilizado para el reconocimiento de minerales y rocas mediante la determinación su dureza relativa.
- Ácido clorhídrico (15% de concentración), utilizado para el reconocimiento de rocas carbonatadas mediante la efervescencia.
- Laptop, usada para el procesamiento de datos, redacción de informe de tesis y elaboración de planos temáticos.

3.3.3. Procedimiento

Etapa de Gabinete (Pre Campo)

Conformada por dos fases: en la primera se planifican las actividades, para ser plasmadas en un cronograma, a fin de que el proyecto de investigación tenga un proceso ordenado y sistemático. Se comienza por la búsqueda de bibliografía enfocada a la problemática de la investigación (mediante libros, informes, artículos científicos, etc.); análisis e interpretación de imágenes satelitales; información geológica publicada con anterioridad por el INGEMMET, teniendo como referencia el Mapa del Cuadrángulo de San Marcos (hoja 15-g), de la Carta geológica del Perú; elaboración de planos temáticos en función de la información geológica obtenida; y la adquisición de los instrumentos para la obtención de datos.

Etapa de Campo

Abarca netamente las actividades de campo, donde se realizó, la descripción de las condiciones geológicas, identificación y medición de geoestructuras, y la caracterización geomecánica y geotécnica en la matriz geológico-geotécnico de los taludes, de acuerdo a cada estación en el tramo Km.1223+400 y Km.1212+600, de la carretera Cajamarca – San Marcos.

Etapa Final (Post Campo)

La información de campo obtenida pasa a procesarse en varios Softwares como: SAS Planet, Global Mapper, ArcGIS 10.8, Dips, Rock Data, Slide. De ellos se obtuvieron figuras, tablas, planos temáticos y resultados que fueron objeto de análisis para su posterior interpretación.

3.4. CLIMA

De acuerdo a SENAMHI, el área de investigación se encuentra dentro de un clima “Semiseco con humedad (Templado)” [C (r) B’], caracterizado por la presencia relativa de lluvias en casi todas las estaciones del año, una eficiencia térmica templada y una humedad muy marcada todo el año. (SENAMHI, 2017)

Tabla 10: Datos históricos meteorológicos promedios, comprendidos entre 2017 y 2024.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura Media	18.65	18.55	18.4	18.25	17.6	16.6	16.05	16.45	17.55	18.4	18.45	18.5
Temperatura Mínima	12.1	12.4	12.5	11.6	10.1	8.5	7.7	8.1	9.9	11.4	11.3	12
Temperatura Máxima	25.2	24.7	24.3	24.9	25.1	24.7	24.4	24.8	25.2	25.4	25.6	25
Precipitación	3.5	4.3	5	2.7	1.1	0.3	0.1	0.1	1.1	2.7	3	3.9

Fuente: (SENAMHI, 2024)

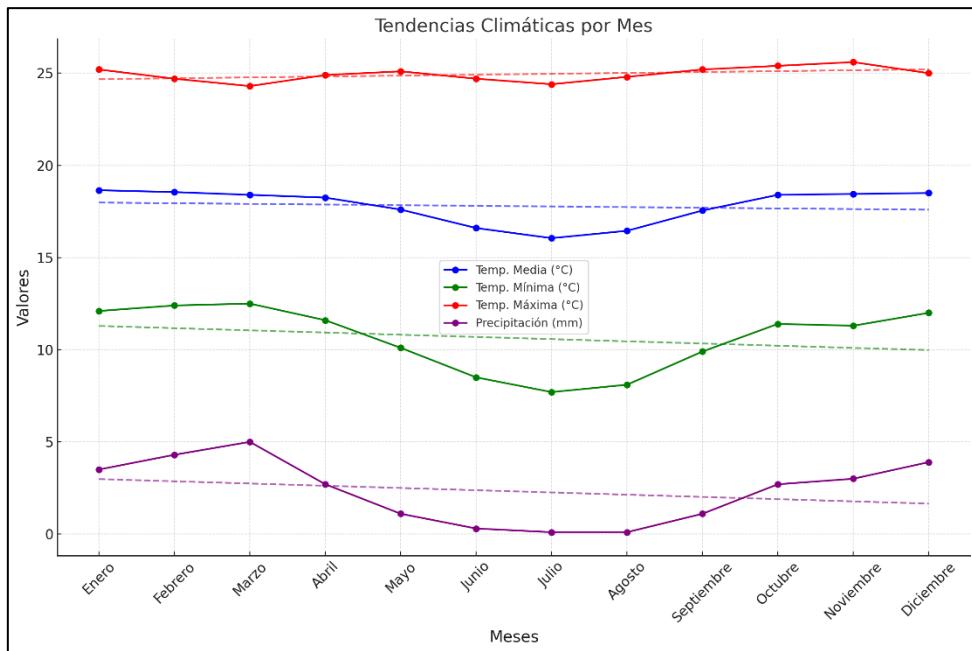


Figura 11: Tendencias Climáticas.

De acuerdo a los datos históricos meteorológicos (2017 – 2024), la precipitación promedio anual es de 27.8 mm. Hay escasa precipitación entre los meses de junio y agosto, con un promedio de 0.17 mm. La mayor cantidad de precipitación ocurre en el mes de diciembre, con un promedio de 3.99 mm. Enero es el mes más caluroso del año con una temperatura media de 18.65 °C. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en julio, cuando está alrededor de 16.05°C.

3.5. GEOLOGÍA LOCAL

La geología local que describe el área de estudio desde el tramo Km. 1212+600 al Km. 1223+400 de la carretera Cajamarca – San Marcos; está conformada por formaciones estratigráficas pertenecientes al Cretácico Inferior. Identificándose por sus rasgos litológicos característicos, a las Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat, como parte del Grupo Goyllarisquizga.

Las Formaciones estratigráficas mencionadas se encuentran cubiertas de manera parcial y superficial por depósitos cuaternarios de tipo coluvial, con mayor incidencia en los taludes que se encuentran al NW y SE del área de investigación.

En el corte de carretera en el área de investigación, se observan macizos rocosos con litologías de areniscas con diferentes tonalidades, cuarzosas, fracturadas y litoarenitas,

acompañadas en ciertas zonas por arcillolitas y calizas margosas. El tipo de litología permite determinar su ambiente de formación y compartiendo el grado de fracturamiento (de moderado a alto) (Ver Plano 05).



Foto 1: Estratificación en areniscas de la Formación Carhuaz. Coordenadas: E 811016; N9188958; Cota= 2415 m.s.n.m.

3.5.1. Formación Chimú

Se puede observar que aflora en la parte central, abarcando la mayoría del área estudio.

La formación Chimú se encontró descrita por areniscas cuarzosas blanquecinas levemente fracturadas de grano medio a grueso con ocasionales granos de cuarzo poco redondeados, con una suave tonalidad parda en las fracturas, debido presencia de óxidos.

3.5.2. Formación Santa

La formación santa aflora de manera leve en la parte NW y al SE del área de estudio, descrita por areniscas grises oscuras debido a la presencia de materia orgánica en la zona, acompañada de arcillitas y calizas margosas.

3.5.3. Formación Carhuaz

Se encuentra abarcando en gran medida el sector N-NE y S – SE del área de estudio.

La formación Carhuaz consta de areniscas cuarzosas y areniscas con tonalidades amarillas a rojizas con la presencia mínima de arcillitas grises, con matices rojizos a pardos, por la presencia de óxidos en el área de estudio.

3.5.4. Formación Farrat

Se ubica delimitando el inicio y final, tanto como por la parte Norte como la Sur del área de investigación.

La formación Farrat se caracteriza en el área de estudio por presentar areniscas cuarzosas blanquecinas acompañadas de litoarenitas en su minoría.

Depósito Coluvio - Aluvial

Conformado por arenas, limos y arcillas subredondeados, conformadas por la acción combinada de la gravedad y flujos de agua, se ubican entre las laderas y quebradas ubicadas en el área de estudio (Ver Plano 05).

3.6. UNIDADES MORFOGENÉTICAS

Las geoformas se encuentran estrechamente relacionadas con los procesos de erosión, y para definirlas, se considera utilizar la Clasificación modificada de (Rodríguez, 2016), que denomina al relieve como Unidades Morfogenéticas, y cuantifica la geometría del relieve (inclinación de la pendiente), de acuerdo a la tabla 11; a partir de una propuesta inicial presentada por Tapia-Varela, G. y López-Blanco, J. (2001), los cuales tienen en cuenta la génesis, edad de las rocas, geometría y tipo del relieve (Ver Plano 03); considerando aplicar ésta clasificación para áreas determinadas, como es el caso del presente trabajo de investigación.

3.6.1. Planicies

Son superficies que presentan una morfología bastante homogénea, ligeramente ondulada, donde los procesos de agrandación superan a los de degradación. Ésta comprende áreas correspondientes al Valle donde se encuentra el Centro Poblado San

Marcos (ver foto 1), dañadas por los procesos de erosión pluvial. Su rango de pendiente se encuentra entre 0° y 8° . Están relacionados con los depósitos coluviales, resultado de la erosión de las rocas pertenecientes al Cretácico inferior hasta el Neógeno y depositadas en el Cuaternario entre el Pleistoceno y Holoceno (Ver Plano 05).



Foto 2: Planicie

3.6.2. Lomadas

Son superficies de terreno con mínimas elevaciones, homogéneas y pendientes suaves. El rango de pendiente de esta Unidad Morfogenética varía de 8° a 20° . Corresponde a gran parte del área del trabajo de investigación, ubicada al NW – N del Centro Poblado San Marcos.

Parcialmente este terreno es utilizado para actividades ganaderas y agrícolas. Y en campo se observa que, litológicamente, está asociado a areniscas cuarzosas, ferruginosas y litoarenitas, pertenecientes a las Formaciones, Carhuaz, Farrat y Chimú, pertenecientes al Cretácico Inferior (Ver Plano 05).

La foto a continuación corresponde a una lomada en la Formación Carhuaz con un ángulo de pendiente de 18°.



Foto 3: Lomada

3.6.3. Laderas

De acuerdo a la clasificación presentada, para el trabajo de investigación, se considera un rango de pendiente entre 20° y 50°, lo cual indica que la superficie del terreno cada vez se encuentra más elevada.

De acuerdo al área de investigación, esta geoforma está descrita por la Formación Carhuaz, conformada por areniscas pardas, moderadamente fracturadas y plegadas; y por la Formación Chimú, conformada por areniscas cuarzosas fracturadas; estimándose la formación de geoestructuras a fines del Mesozoico e inicios del Cenozoico (Ver Plano 05).



Foto 4: Ladera

3.6.4. Escarpas

Dávila (2011), lo describe como una gran pendiente en los terrenos que delimita a dos superficies con tendencias planas. Es así que, para el área de investigación, se identifica hacia la parte más superior de la carretera, un desnivel con superficies no necesariamente planas, producto de las de diferentes geoformas presentes; esto, debido al resultado del comportamiento del macizo rocoso frente a las deformaciones estructurales y al grado de erosión (Rodríguez, 2016).

En este trabajo de investigación, el rango de pendiente que caracteriza a esta Unidad Morfogenética, es ser mayor a 50° . El área que involucra, corresponde a parte de la Formación Carhuaz, pertenecientes al Cretácico Inferior, conformadas por areniscas y areniscas cuarzosas, con un grado de fracturamiento de ligera a moderado, presentando inestabilidad (Ver Plano 05).



Foto 5: Escarpa

Tabla 11: Unidades Morfogenéticas del trabajo de investigación.

TIPO DE RELIEVE	GEOMETRÍA	LITOLOGÍA	ORIGEN	EDAD DE LA LITOLOGÍA		
				Periodo	Época	Edad
Unidad Morfogenética	Pendiente	Asociada a su composición	Asociado al evento o proceso geológico			
Planicies	0° - 8°	Fm. Carhuaz	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Neocomiano
Lomadas	8° - 20°	Fm. Farrat, Fm. Carhuaz y Fm. Chimú	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Neocomiano - Aptiano
Laderas	20° – 50°	Fm. Carhuaz y Fm. Chimú	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Neocomiano
Escarpas	>50°	Fm. Carhuaz	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Neocomiano

3.7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Se han identificado diversas geoestructuras en el tramo de carretera, Km. 1212+600 al Km. 1223+400; producidas por la interacción de procesos tectónicos, sedimentarios, ígneos, metamórficos, erosivos y químicos a lo largo del tiempo geológico. Las fuerzas tectónicas y la sedimentación forman estructuras primarias y secundarias debido al movimiento de placas. La formación de estas geoestructuras, se estima entre un rango entre inicios del cretácico y durante el Cenozoico (Ver Plano 05).

3.7.1. Estructuras Primarias

Son aquellas que su génesis es en el instante de la formación de la roca, casi siempre durante los procesos de sedimentación, enfriamiento o solidificación.

3.7.2. Estructuras Secundarias

Son aquellas que se forman después del proceso de litificación y se encuentran relacionadas con agentes geológicos internos (fuerzas de compresión y tensión) que generan deformación y desplazamiento de grandes masas rocosas.

Deformación dúctil

Cuando las rocas tienden a deformarse generando pliegues, al ser sometidos a determinados esfuerzos.

- Pliegues**

En la zona de estudio, se observan en las areniscas de la Formación Chimú pliegues en estratos delgados de areniscas, los cuales forman estructuras sinuosas encajadas entre rocas más resistentes. Estos pliegues son resultado de esfuerzos tectónicos compresivos y generan un mayor número de discontinuidades, lo que influye directamente en la estabilidad de los taludes, lo que los convierte en un factor clave en la inestabilidad de los taludes analizados (Ver foto 6) (Ver Plano 05).



Foto 6: Pliegue en areniscas de la Formación Chimú. Coordenadas: E 809262; N 9192417; Cota= 2703 m.s.n.m.

Deformación frágil

- **Diaclasas**

Se encuentran descritas en las areniscas de la Formación Chimú, evidenciando la fracturamiento del macizo rocoso como resultado de esfuerzos tectónicos. Con una orientación noroeste-sureste y afectan la continuidad y la estabilidad del terreno. Este tipo de estructuras es común en la zona de estudio y tiene una influencia importante en el comportamiento geotécnico y la permeabilidad de las rocas.

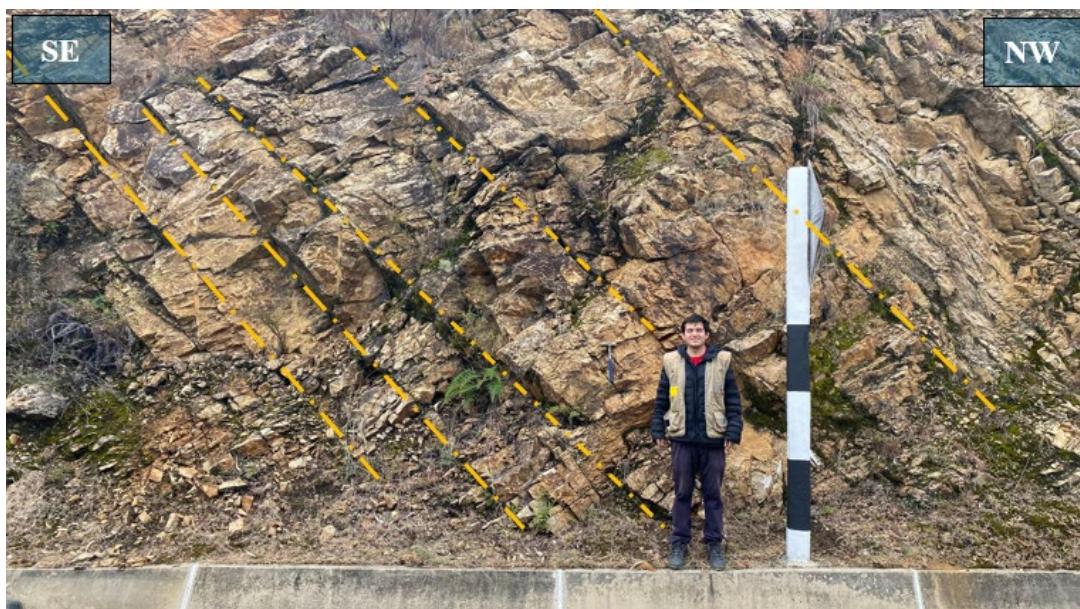


Foto 7: Diaclasas

- **Fallas**

En el punto E 808507 N 9192597 Cota 2755 m.s.n.m., se evidencia falla inversa en estratos de roca arenisca de la formación Chimú, donde la zona del plano de falla se encuentra severamente meteorizado y alterado, con grado de fracturamiento intenso. La orientación del plano de falla es de 220° N y buzamiento de 70° (ver Foto 8) (Ver Plano 05).



Foto 8: Falla inversa en las areniscas de la Formación Carhuaz.

3.8. GEOTECNIA

Este apartado abarca la investigación geotécnica fundamental para la determinación de inestabilidad en los taludes comprendidos entre el Km.1212+600 y Km.1223+400 de la carretera Cajamarca – San Marcos. Para ello, las investigaciones de campo empezaron con el estudio in – situ de los taludes en el corte de carretera que abarca la zona de investigación, con el propósito de conocer la disposición de los materiales que los constituyen, así como, los indicios que lleven a considerarlos como inestables o tiendan a la inestabilidad, en función de la geodinámica activante.

La inspección se realizó utilizando métodos empíricos mediante el uso de las clasificaciones geomecánicas, como: Índice de calidad de la roca (RQD) según Deere 1967, Índice Geológico de Resistencia (GSI) según Hoek 1997, y Valoración del macizo rocoso (RMR) según Bieniawski 1989.

Cierta parte de las condiciones de inestabilidad en taludes, es obtenida a través del método analítico; para lo cual, se realizaron proyecciones estereográficas con las familias de discontinuidades del macizo rocoso, utilizando el estereograma de Schmidt (igual área) en el Software Dips v7.0, siendo propensos a provocar fallas tipo planar y en cuña; y, cuyo grado de ocurrencia es determinada porcentualmente mediante el análisis cinemático de fallas.

Teniendo en cuenta que los criterios de rotura de Morh-Coulumb y Hoek & Brown, se procesaron otros datos en el Software RocData v4.0, hallando de manera cuantitativa los parámetros de resistencia, donde los valores fueron analizados e ingresados a los métodos de equilibrio límite con el objetivo de obtener el factor de seguridad (mediante Software Slide v6.0), que definen de manera numérica la inestabilidad de los taludes en área de investigación.

Se usó el Software Loadcap de Geostru 2018 para hallar los coeficientes sísmicos horizontal (k_h) y vertical (k_v) fundamentales para el análisis sísmico. El área de investigación se localiza en la Zona Sísmica 3 (ver Figura 9), correspondiente a la aceleración sísmica máxima considerada 0.35.

La caracterización geotécnica de la carretera Cajamarca – San Marcos se ha sectorizado por estaciones geotécnicas críticas, donde se definió el comportamiento geológico – geomecánico, a través de la Valoración del Macizo Rocosso (RMR) Bieniawski 1989; Índice de Calidad de la Roca (RQD) e Índice de Resistencia Geológica (GSI) según Hoek, 2013. Dentro de la metodología analítica se realizaron proyecciones estereográficas (Dips.v6.0), con las familias de discontinuidades propensas a generar las fallas del tipo planar y cuña. Para luego calcular el Factor de seguridad (FS) de los taludes mediante el método de equilibrio límite (Slide.v6.0) (Ver Plano 06).

3.8.1. Estación Geotécnica SM – 01

Esta estación presenta un ancho de carretera de 7.60 m. y el talud de corte tiene una altura de 4.7m, donde encontramos areniscas blanquecinas con coloraciones beige de aspecto macizo en la parte inferior y más delgado en la superior (Foto 9), perteneciente a la Formación Carhuaz (Ver Plano 05), con planos de estratificación que tienen DIP 80° y DD 278° como se muestra en la Figura 13.

Las datos y características del talud de corte de carretera y de las familias de discontinuidades principales observadas en campo han sido obtenidos utilizando el instrumento de recolección de datos denominado Registro Geológico-Geotécnico (Fuente: Rodríguez 2016).

COORDENADAS			GEOMETRÍA DEL TALUD			
NORTE	ESTE	COTA	ALTURA	PIE	DIP	DD
9193724m	807642m	2847m.s.n.m.	4.7m	10.7m	80°	278°



Foto 9: Geometría del talud SM-01(a). Familias del talud SM-01(b).

Cálculo del RQD

Se realizó mediante la ecuación: $RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$

Donde: $\lambda = ND/L = 9.5$

$ND = 19$ y $L = 2$

Se obtiene $RQD = 75.41$

- λ = Espaciamiento Promedio entre Discontinuidades
- ND = Número de discontinuidades
- RQD = Designación de Calidad de Roca

Cálculo del RMR₈₉

Se calculó el RMR₈₉ obteniendo como resultado el valor de **67** dando una clasificación geomecánica Tipo II - Calidad Buena (ver Tabla 13).

Tabla 12: Asignación de valores para el macizo rocoso, Estación SM- 01.

SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR	
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES			Rango de Valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Indice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	12	
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa 1- Mpa < 1 Mpa		
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0	
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		17	
	Valoración	20	17	13	8	3			
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm		15	
	Valoración	20	15	10	8	5			
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura de 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas		13	
		Valoración	30	25	20	10	0		
	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125		
		Presión de agua/o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	Valoración	15	10	7	4	0		13	
	Longitud de las discontinuidades-persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m			
	Valoración	6	4	2	1	0			
	Separación (apertura)	Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm			
	Valoración	6	5	4	1	0			
	Rugosidad	Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla			
	Valoración	6	5	3	1	0			
	Relleno ()	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm			
	Valoración	6	4	2	1	0			
	Intemperización	Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta			
CLASIFICACION	Valoración	6	5	3	1	0			
	Puntuacion	(81 - 100)	(61 - 80)	(41 - 60)	(21 - 40)	(<20)			
	Clase	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V			
		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala			
VALOR TOTAL RMR		67		TIPO DE ROCA		Buena			

Cálculos en el Software RocData

Se hizo uso del software RocData, para obtener las propiedades y parámetros geomecánicos del macizo rocoso, tal como se muestra en la Figura 12.

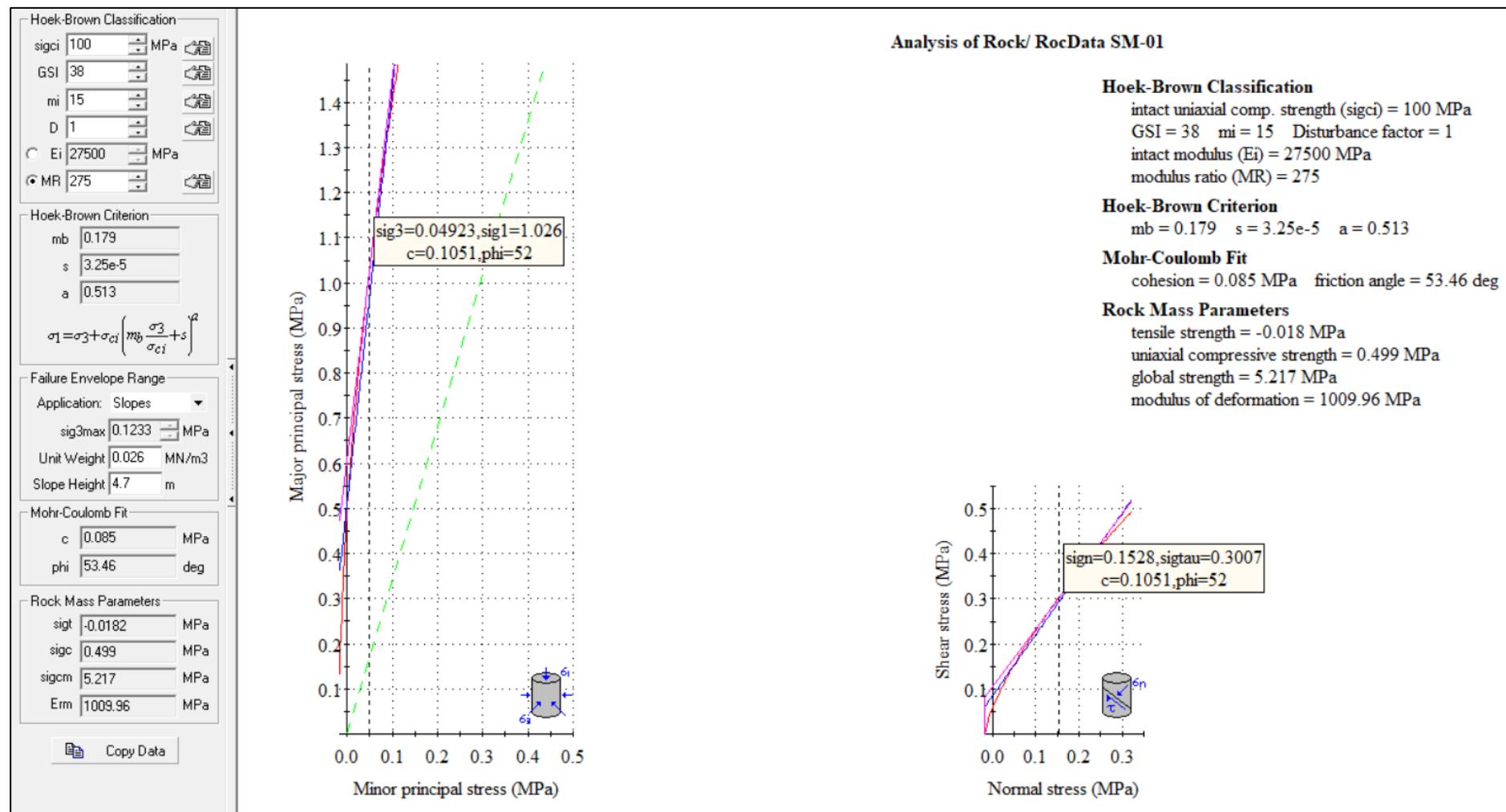


Figura 12: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-01.

Diseño en el Software Dips v7.0

El análisis cinemático se realizó a través de proyecciones estereográficas de las discontinuidades evidenciadas en campo en la Estación SM-01; definiendo qué: en el diagrama de polos y círculos máximos, contorno de distribución de Fisher; respeto al talud, ángulo de fricción y zona de riesgo de falla; el macizo rocoso muestra probabilidad de 0.00% de rotura planar (Ver figura 13(a)); 5.24% probabilidad de rotura en cuña (Ver Figura 13 (b)).

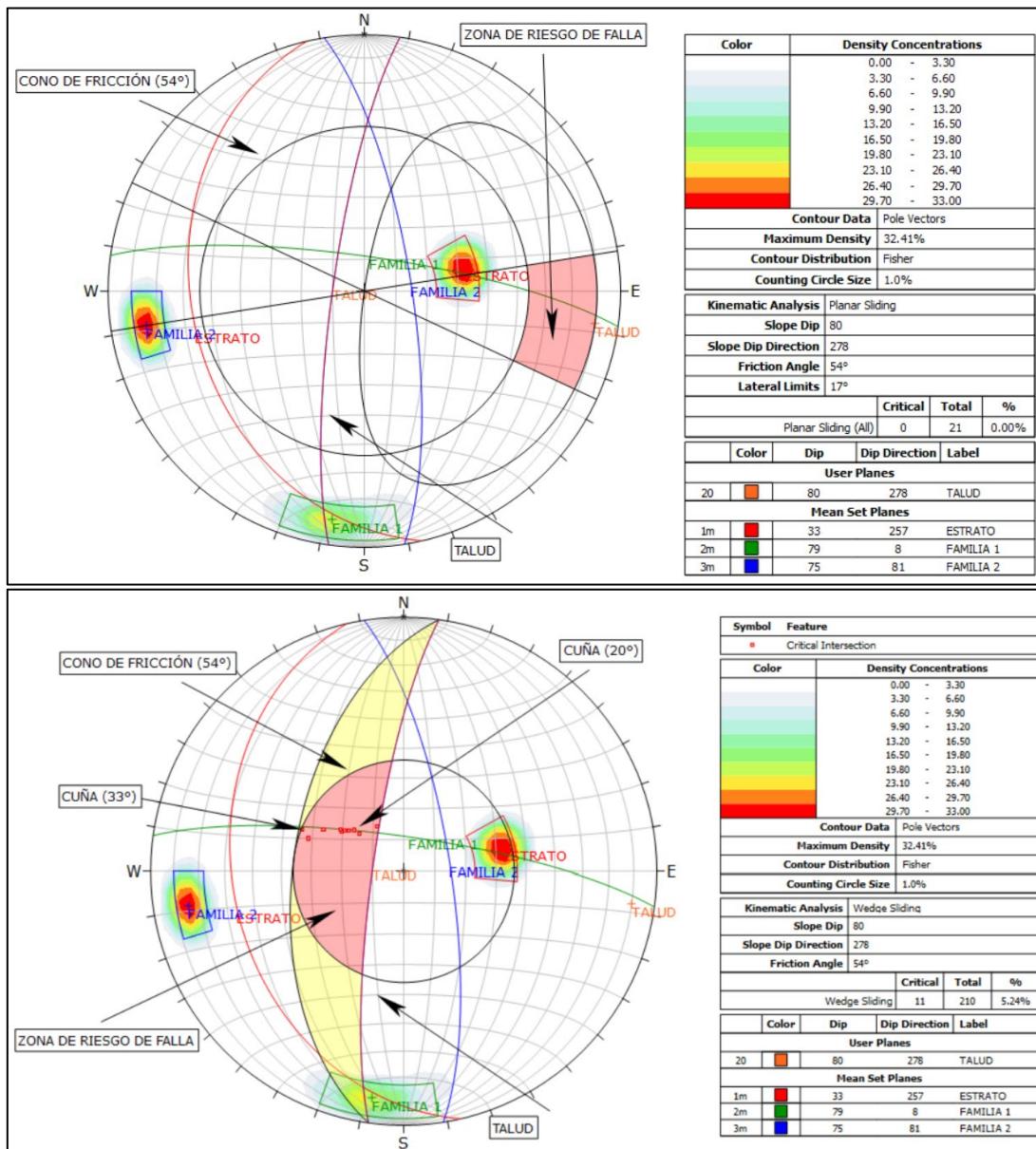


Figura 13: Estación SM-01, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).

Interpretación: La Figura 13a muestra una concentración significativa de discontinuidades orientadas de forma paralela o subparalela al plano del talud, lo que favorece la rotura planar. Además, se identifican intersecciones críticas entre familias de discontinuidades, generando condiciones favorables para rotura en cuña (Ver figura 13b), con un riesgo acumulado superior al 45%. Esta configuración confirma la existencia de una estructura interna desfavorable, en línea con los valores de número de discontinuidades altos y espaciamiento reducido.

Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0

Los métodos utilizados para poder calcular el factor de seguridad fueron: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado LE/Morgenstern-Price, y Spencer; el número de dovelas fueron 30, tolerancia 0.005 y un máximo de 50 iteraciones y el método de búsqueda de la falla crítica fue de “Grid Search”.

El cálculo del FS se realizó en condiciones normales y condiciones efectivas más sismicidad, considerando la aceleración sísmica máxima de 0.25; coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.125 (Kh) y coeficiente de aceleración máximo vertical de 0.0625 (Kv). El resultado del análisis se muestra en la Tabla 14, donde se determina que el Talud de la estación SM-01 presenta inestabilidad.

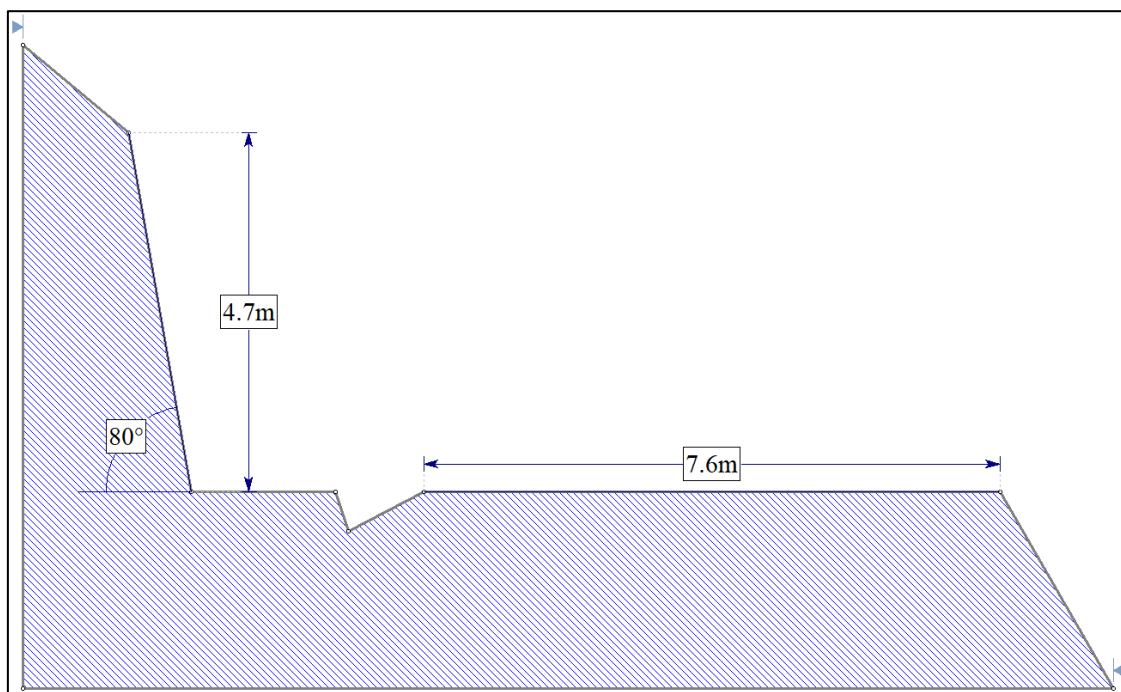


Figura 14: Estación SM-01, dimensiones del Talud.

Tabla 13: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-01.

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	1.104	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.009	Inestable
Janbu simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	1.151	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.001	Inestable
Spencer	Condiciones de Tensiones Totales	1.172	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.005	Inestable
Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	1.179	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.196	Inestable

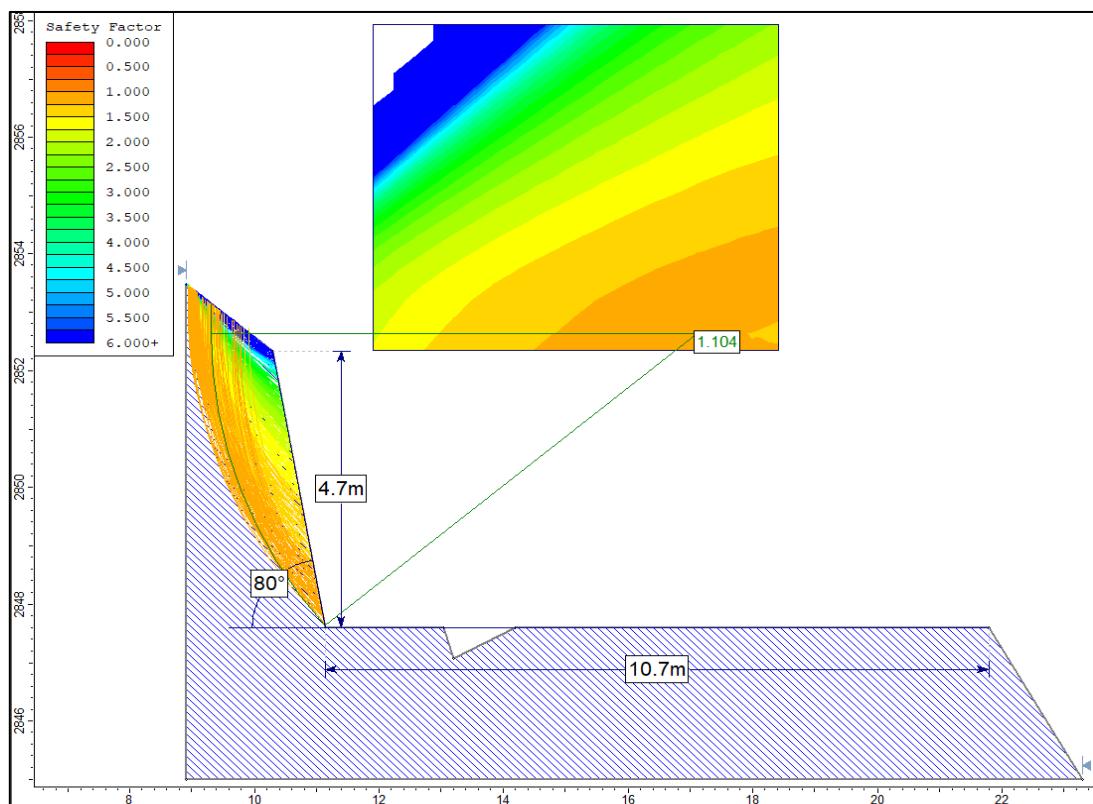


Figura 15: Factor de seguridad SM-01 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

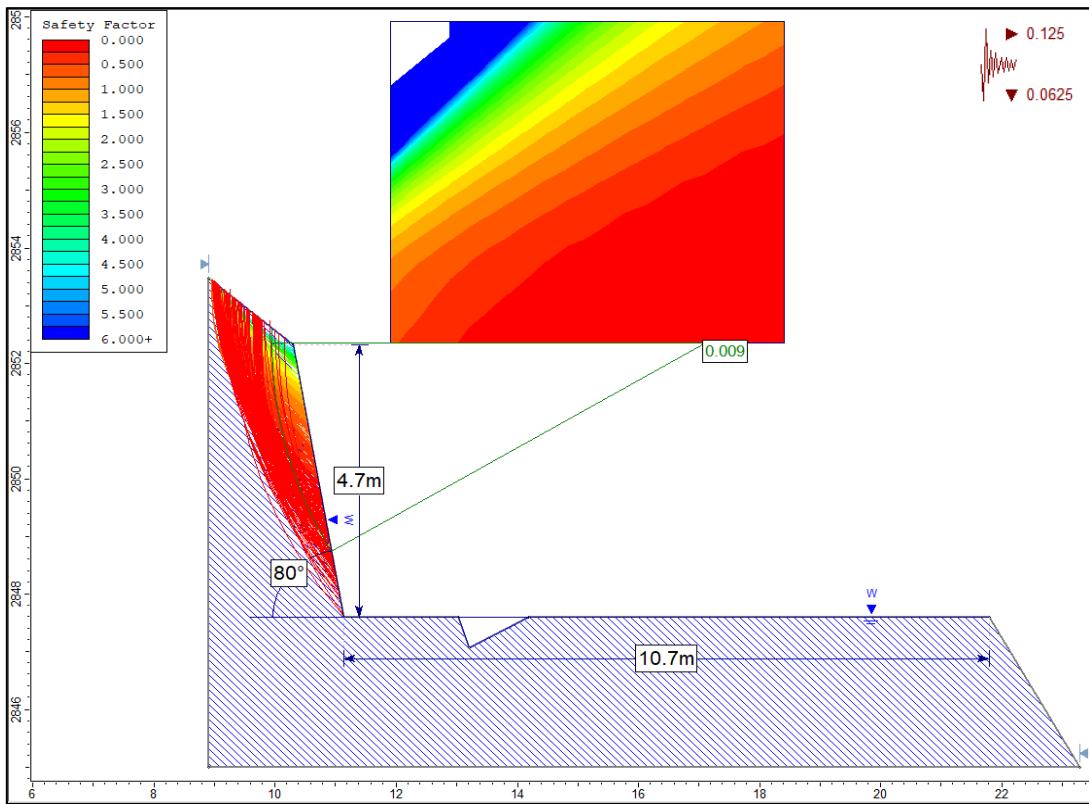


Figura 16: Factor de seguridad SM-01 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

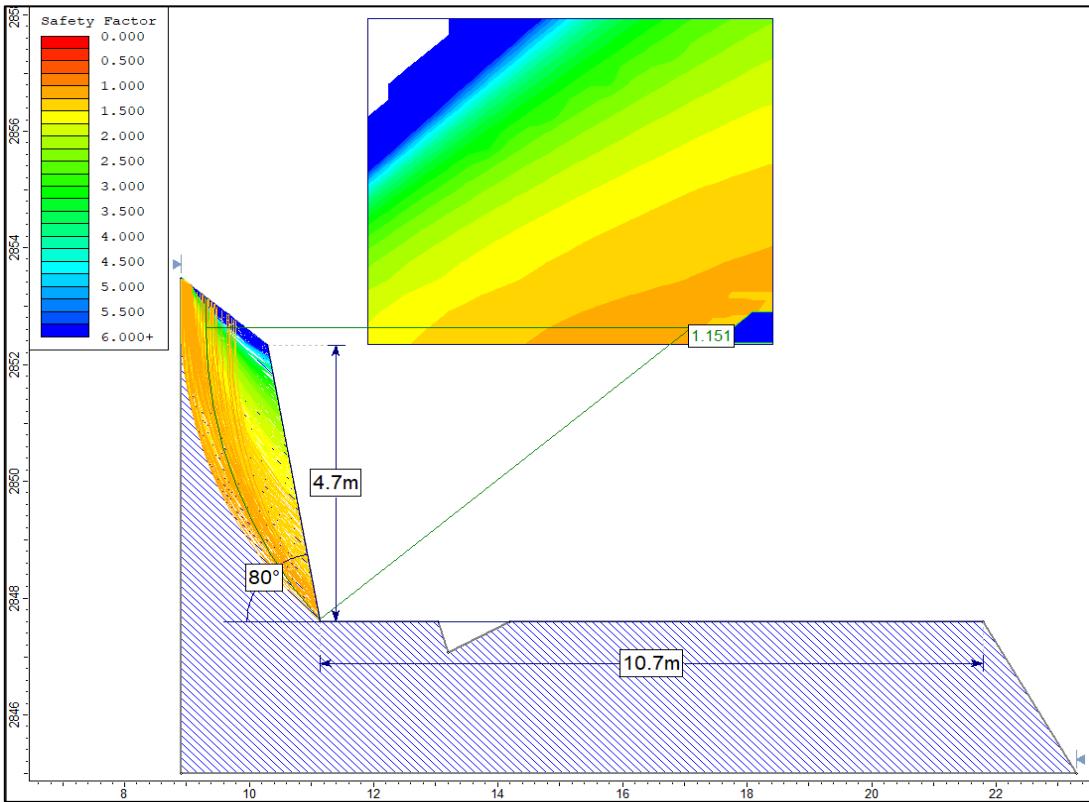


Figura 17: Factor de seguridad SM-01 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

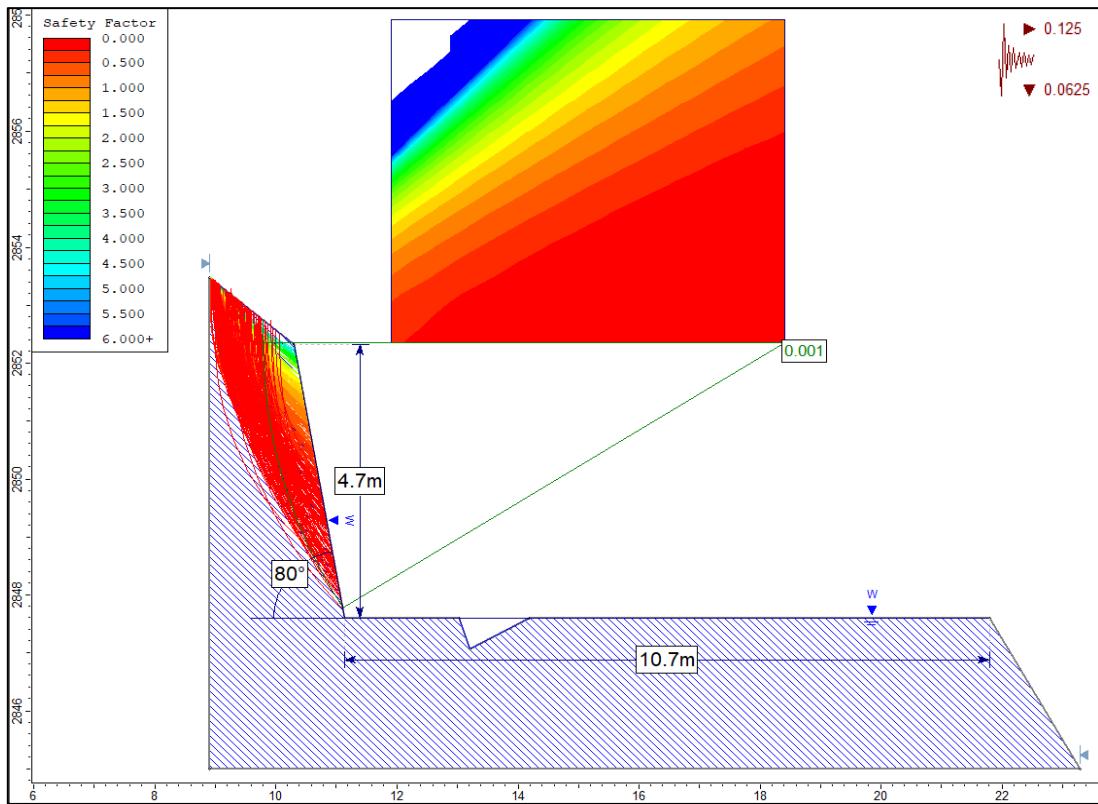


Figura 18: Factor de seguridad SM-01 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

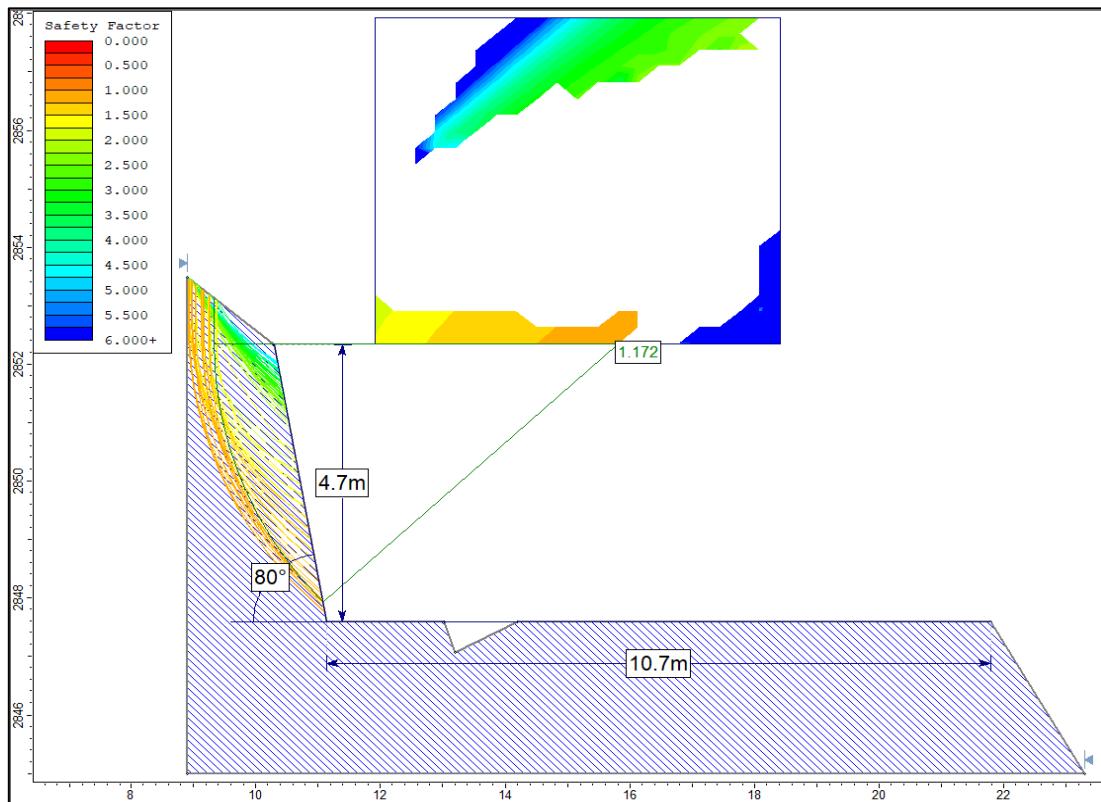


Figura 19: Factor de seguridad SM-01 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales

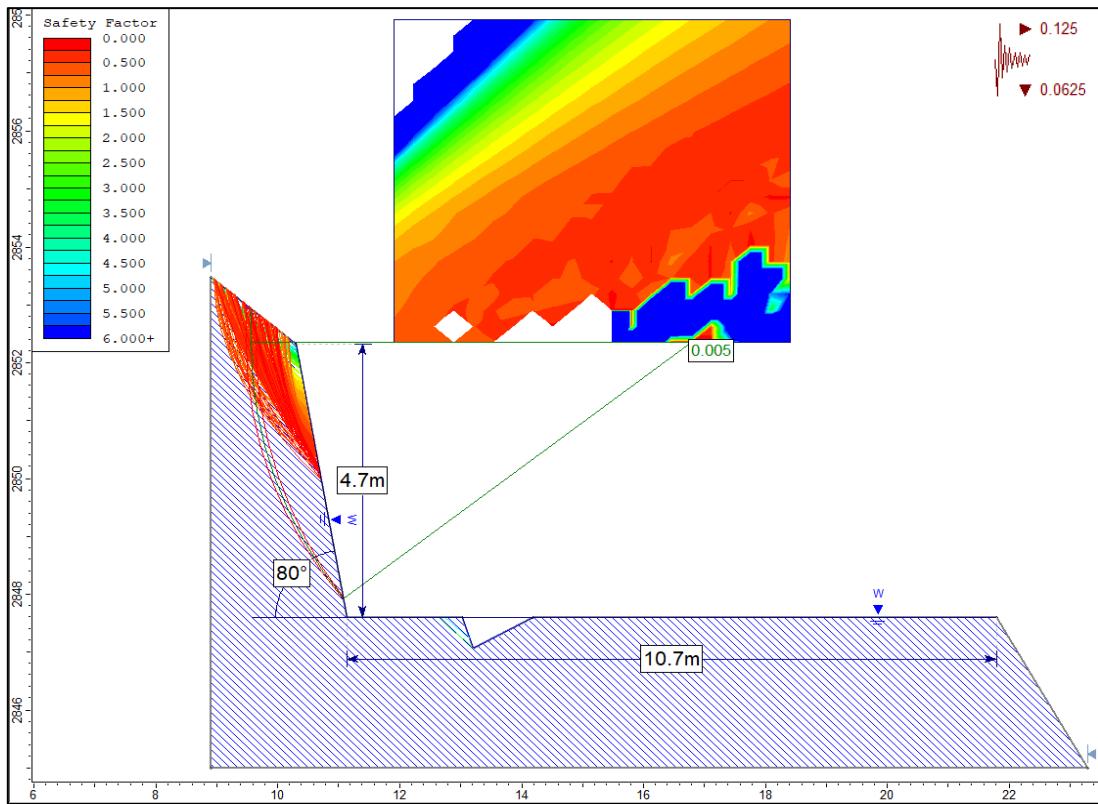


Figura 20: Factor de seguridad SM-01 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

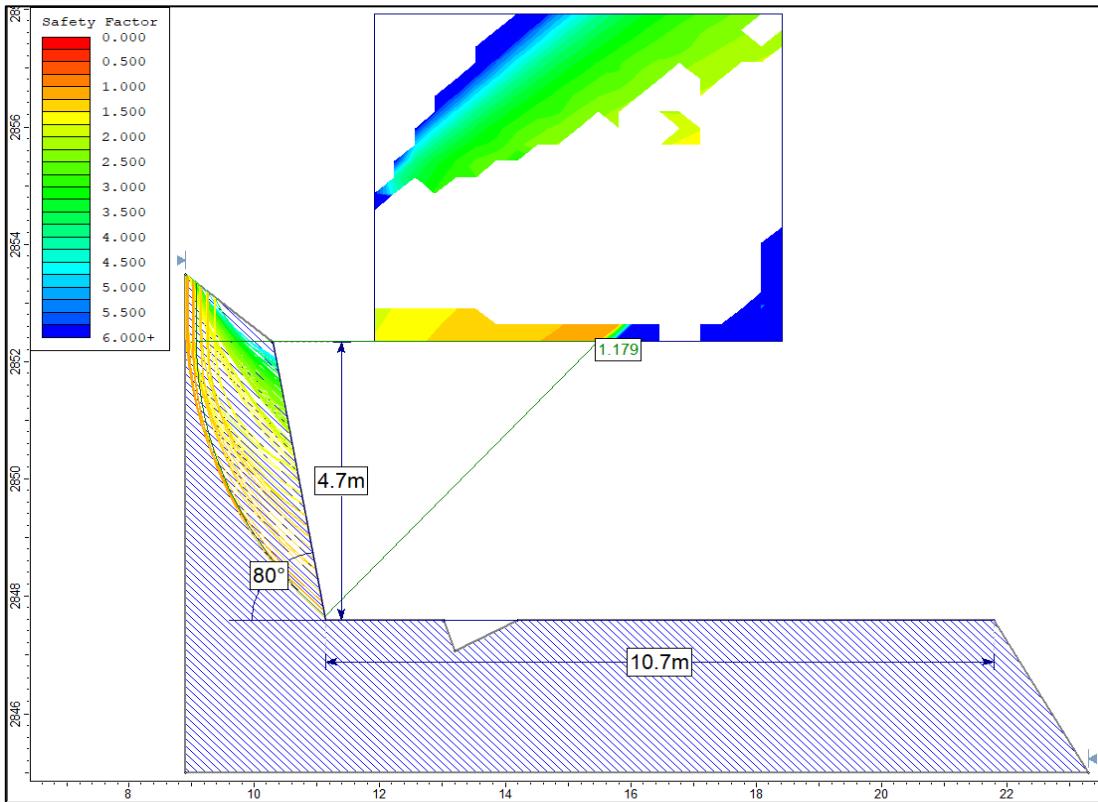


Figura 21: Factor de seguridad SM-01 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales

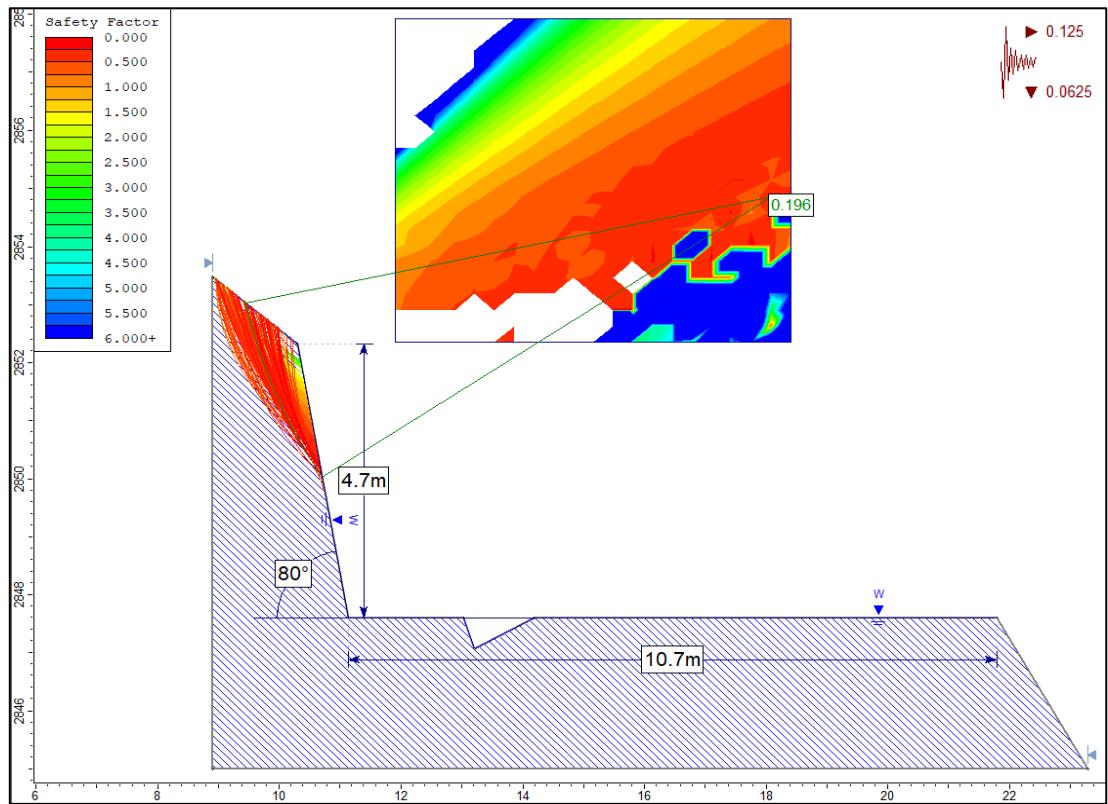


Figura 22: Factor de seguridad SM-01 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

3.8.2. Estación Geotécnica SM – 02

S se encuentra ubicada en la Formación Carhuaz, descrita por una pendiente de 70° y una altura de 9.6m (Ver Foto 10a), por areniscas cuarzosas con una tonalidad blanquecina a parda, principalmente por la presencia de óxidos. Se encuentra conformado por tres familias de discontinuidades (Ver Foto 10b); moderadamente meteorizados y grado de fracturamiento medio – alto. Se evidencia mayor meteorización en el estrato principalmente por los agentes geológicos que persisten en la zona (Ver Foto 10).

COORDENADAS			GEOMETRÍA DEL TALUD			
NORTE	ESTE	COTA	ALTURA	PIE	DIP	DD
9193636m	808157m	2825m.s.n.m.	9.6m	10 m	75°	262°



Foto 10: Geometría del talud SM-02(a). Familias del talud SM-02(b).

Cálculo del RQD

Se realizó mediante la ecuación: $RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$

Donde: $\lambda = ND/L = 9.2$

$ND = 22$ y $L = 2.4$

Se obtiene $RQD = 76.5$

- $\lambda = \text{Espaciamiento Promedio entre Discontinuidades}$
- $ND = \text{Número de discontinuidades}$
- $RQD = \text{Designación de Calidad de Roca}$

Cálculo del RMR89

Se calculó el RMR89 obteniendo como resultado el valor de **66** dando una clasificación geomecánica Tipo II - Calidad Buena (ver Tabla 15).

Tabla 14: Asignación de valores para el macizo rocoso, Estación SM- 02.

SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES			Rango de Valores					
1	Resistencia de la roca intacta	Indice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	7
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa 1- Mpa < 1 Mpa	
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
3	Valoración	20	17	13	8	3		
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm		
3	Valoración	20	15	10	8	5		
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura de 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas		
4	Valoración	30	25	20	10	0		
5	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	10	
5		Presión de agua/o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5		
5		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo		
5	Valoración	15	10	7	4	0		
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES								
Longitud de las discontinuidades-persistencia			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m	
Valoración			6	4	2	1	0	
Separación (apertura)			Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm	
Valoración			6	5	4	1	0	
Rugosidad			Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla	
Valoración			6	5	3	1	0	
Relleno ()			Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm	
Valoración			6	4	2	1	0	
Intemperización			Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta	
Valoración			6	5	3	1	0	
CLASIFICACION	Puntuacion	(81 - 100)	(61 - 80)	(41 - 60)	(21 - 40)	(<20)		
	Clase	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V		
		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala		
VALOR TOTAL RMR		66		TIPO DE ROCA	Buena			

Cálculos en el software RocData

Se hizo uso del software RocData, para obtener las propiedades y parámetros geomecánicos del macizo rocoso, tal como se muestra en la Figura 23.

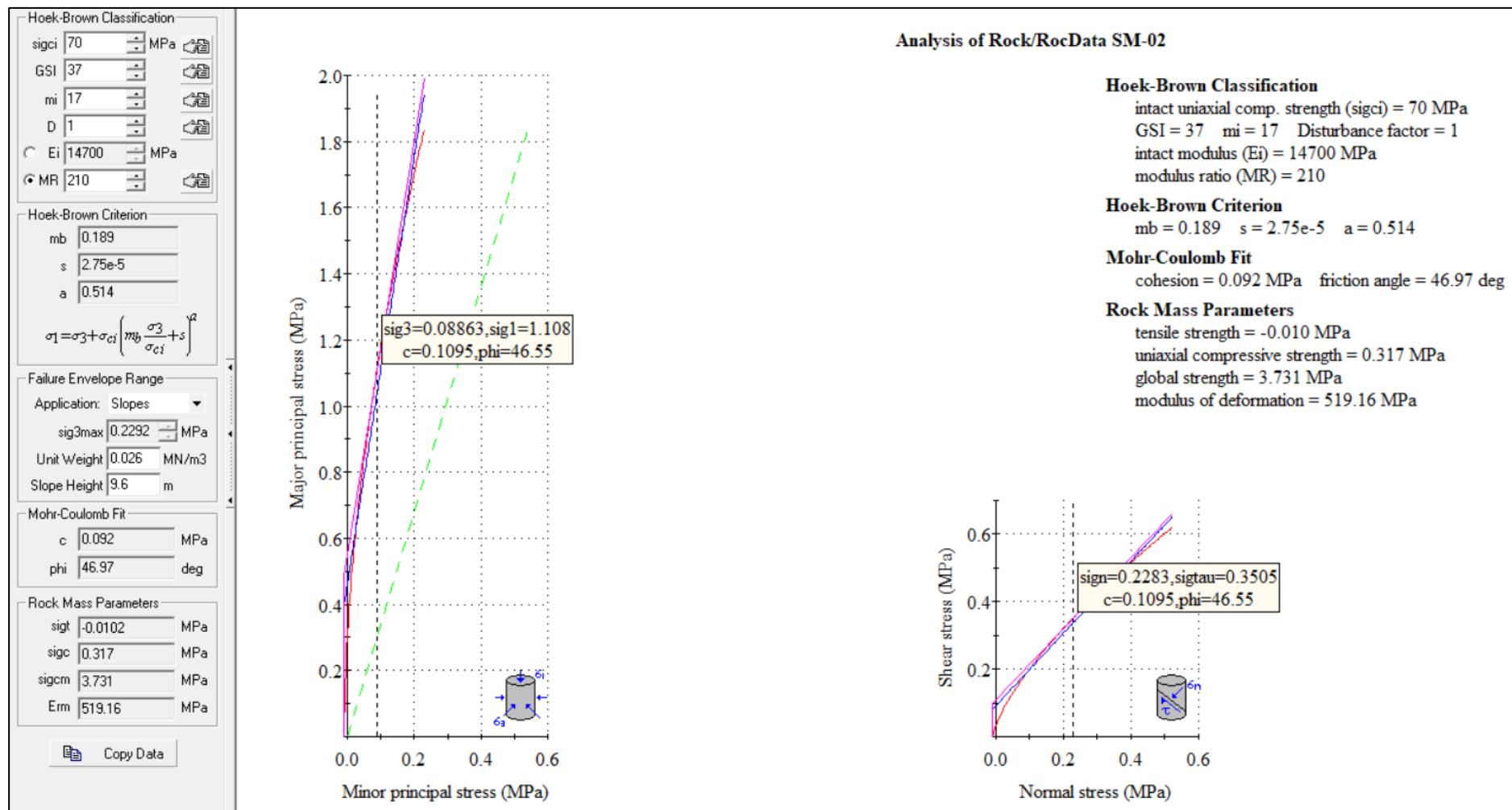


Figura 23: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-02.

Diseño en el Software Dips v7.0

El análisis cinemático se realizó a través de proyecciones estereográficas de las discontinuidades evidenciadas en campo en la Estación SM-02; definiendo qué: en el diagrama de polos y círculos máximos, contorno de distribución de Fisher; respecto al talud, ángulo de fricción y zona de riesgo de falla; el macizo rocoso muestra probabilidad de 23.81% de rotura planar (Ver figura 24 (a)); 20.00% probabilidad de rotura en cuña. (Ver Figura 24 (b)).

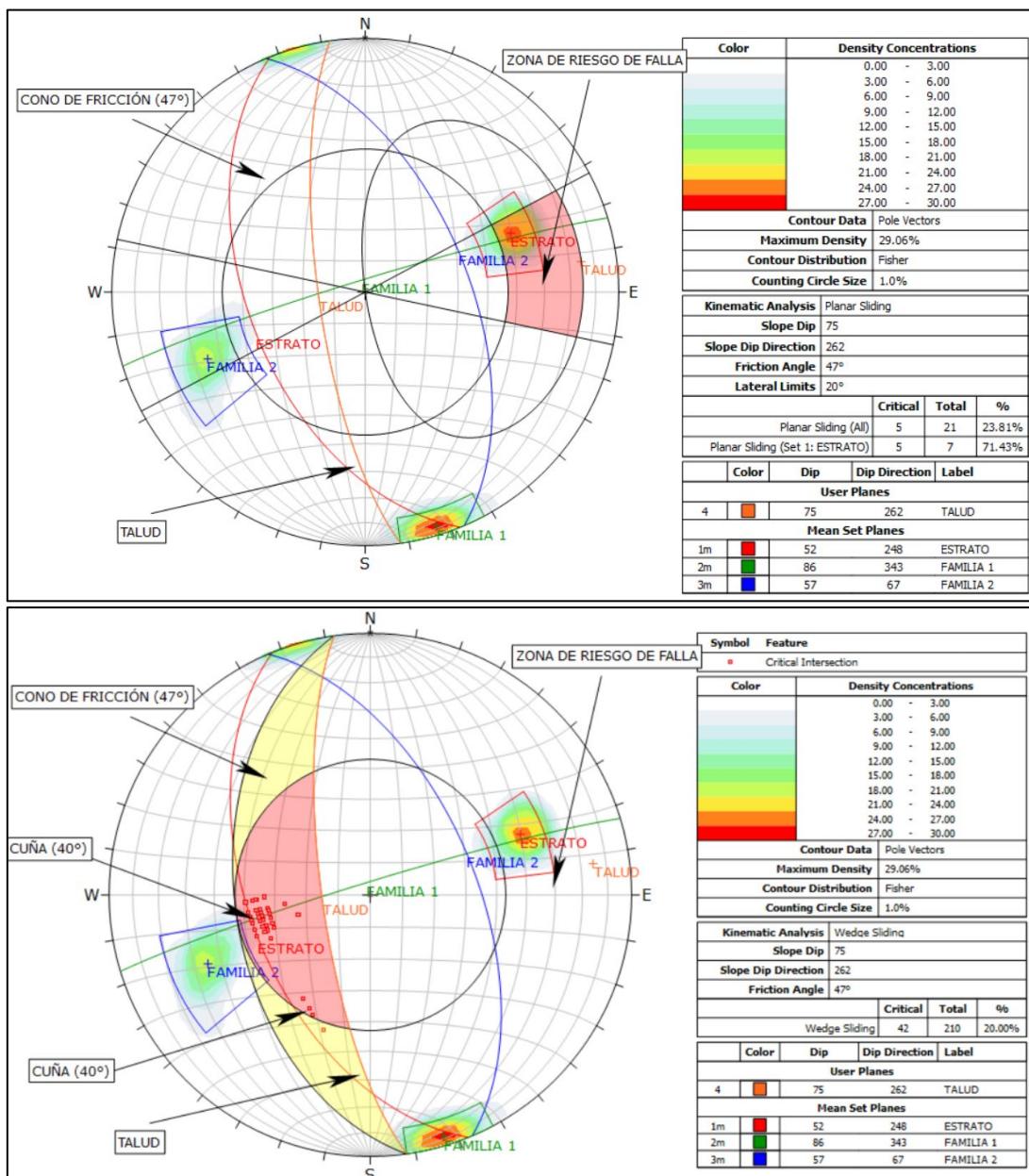


Figura 24: Estación SM-02, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).

Interpretación: En el análisis estereográfico (Figura 24) se observa un patrón similar a la estación SM-01, pero con menor densidad de intersecciones. No obstante, la presencia de planos de deslizamiento en dirección concordante con el talud permite concluir que existe una rotura planar potencial activa, con una probabilidad de 23.81%. La cuña definida por la intersección de dos familias de discontinuidades también genera riesgo significativo.

Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0

Los métodos utilizados para poder calcular el factor de seguridad fueron: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado LE/Morgenstern-Price, y Spencer; el número de dovelas fueron 30, tolerancia 0.005 y un máximo de 50 iteraciones y el método de búsqueda de la falla crítica fue de “Grid Search”.

El cálculo del FS se realizó en condiciones normales y condiciones efectivas más sismicidad, considerando la aceleración sísmica máxima de 0.25; coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.125 (Kh) y coeficiente de aceleración máximo vertical de 0.0625 (Kv). El resultado del Análisis se muestra en la Tabla 16, donde se determina que el Talud de la estación SM-02 presenta inestabilidad.

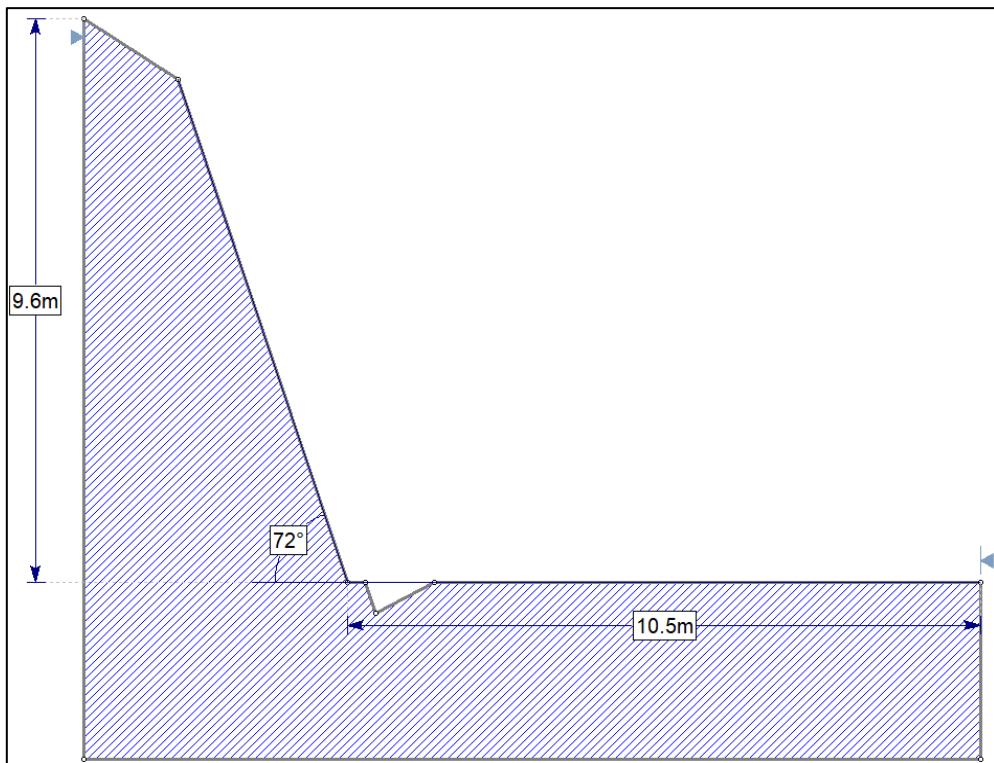


Figura 25: Estación SM-02, dimensiones del Talud.

Tabla 15: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-02.

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	1.003	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.057	Inestable
Janbu simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	0.960	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.005	Inestable
Spencer	Condiciones de Tensiones Totales	0.999	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.364	Inestable
Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	0.997	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.330	Inestable

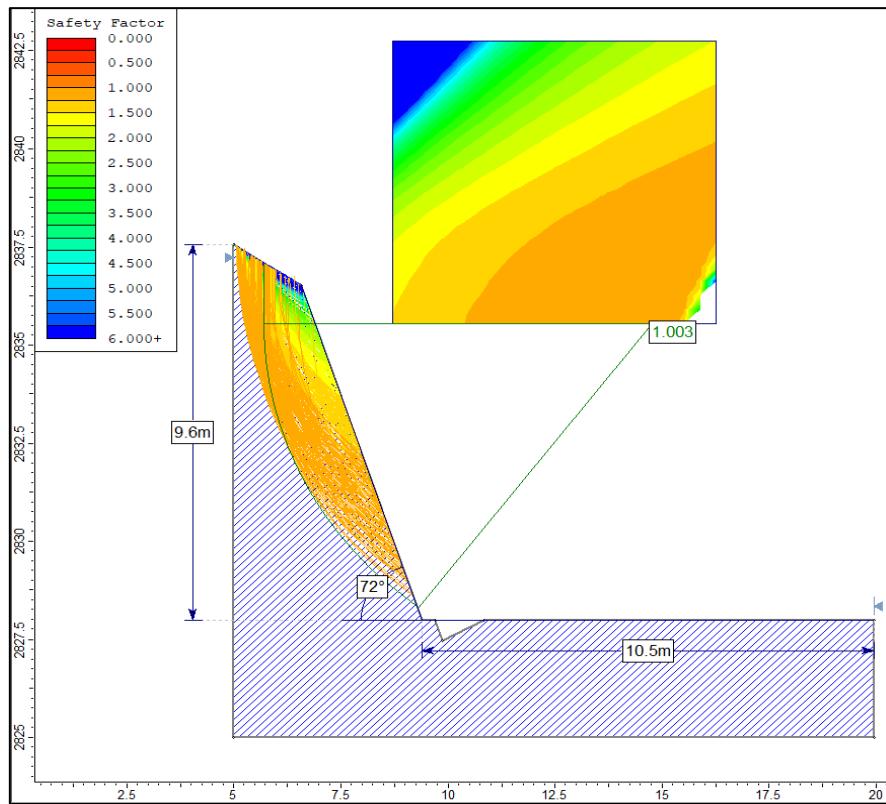


Figura 26: Factor de seguridad SM-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales

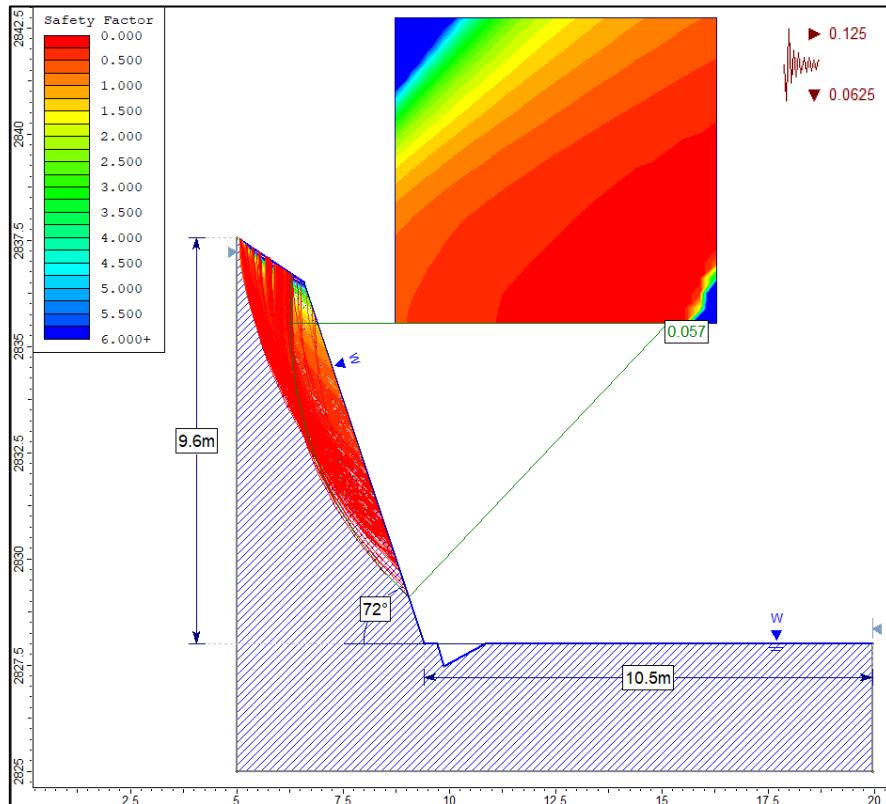


Figura 27: Factor de seguridad SM-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

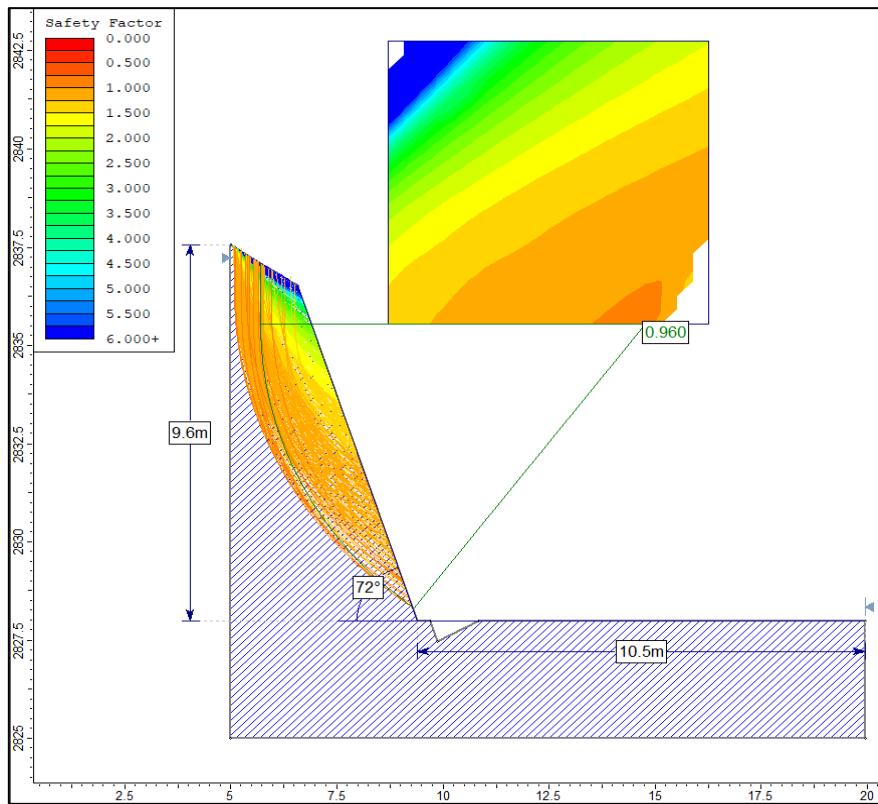


Figura 28: Factor de seguridad SM-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales

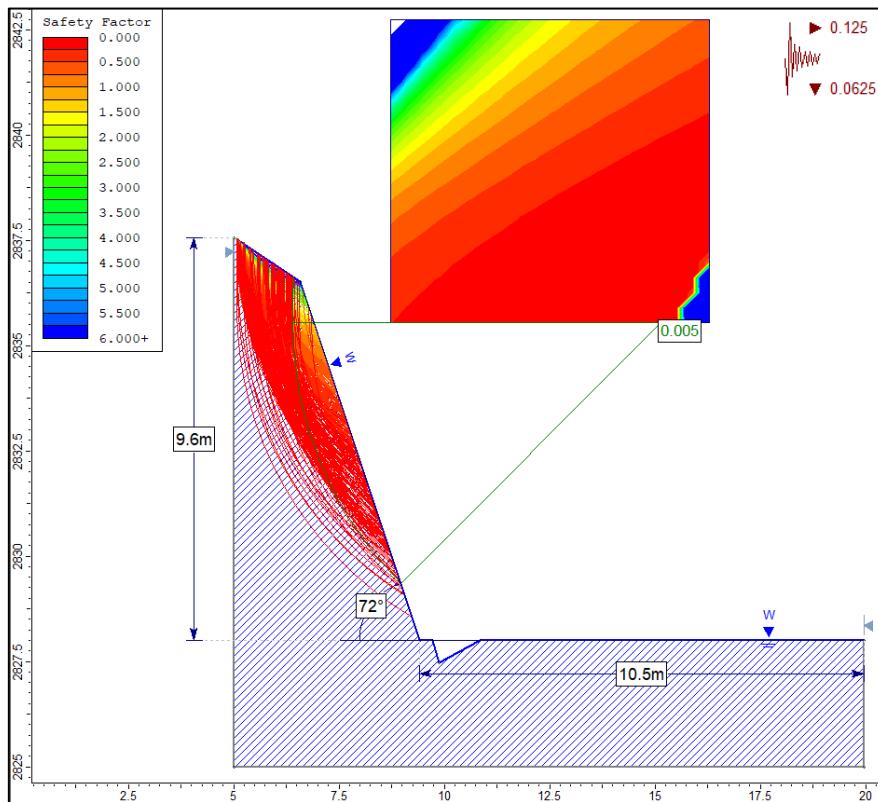


Figura 29: Factor de seguridad SM-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

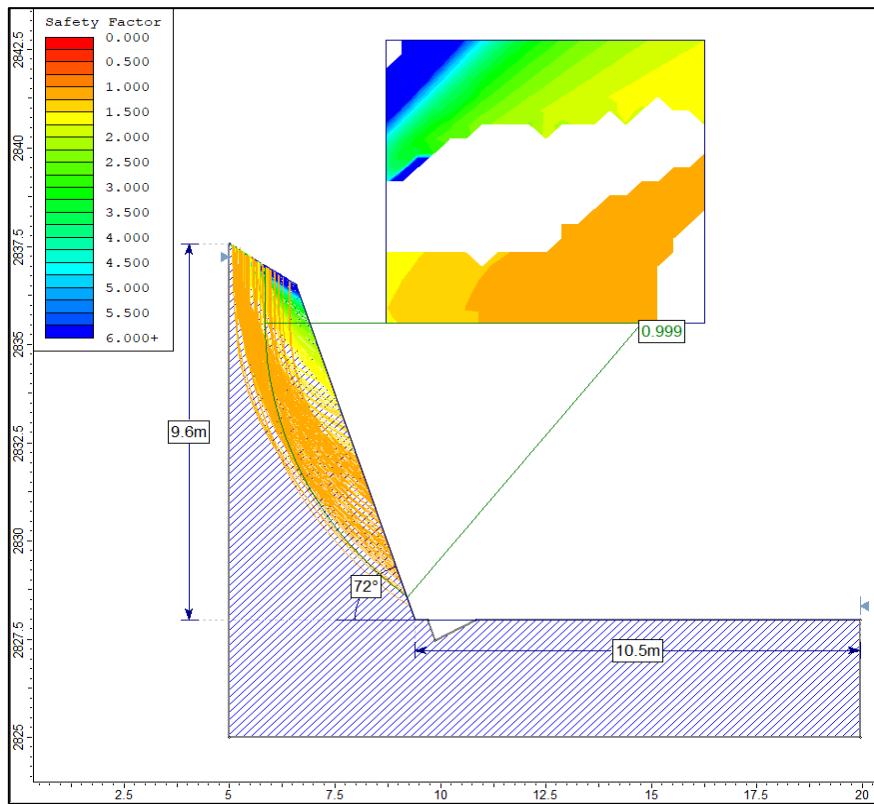


Figura 30: Factor de seguridad SM-02 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales

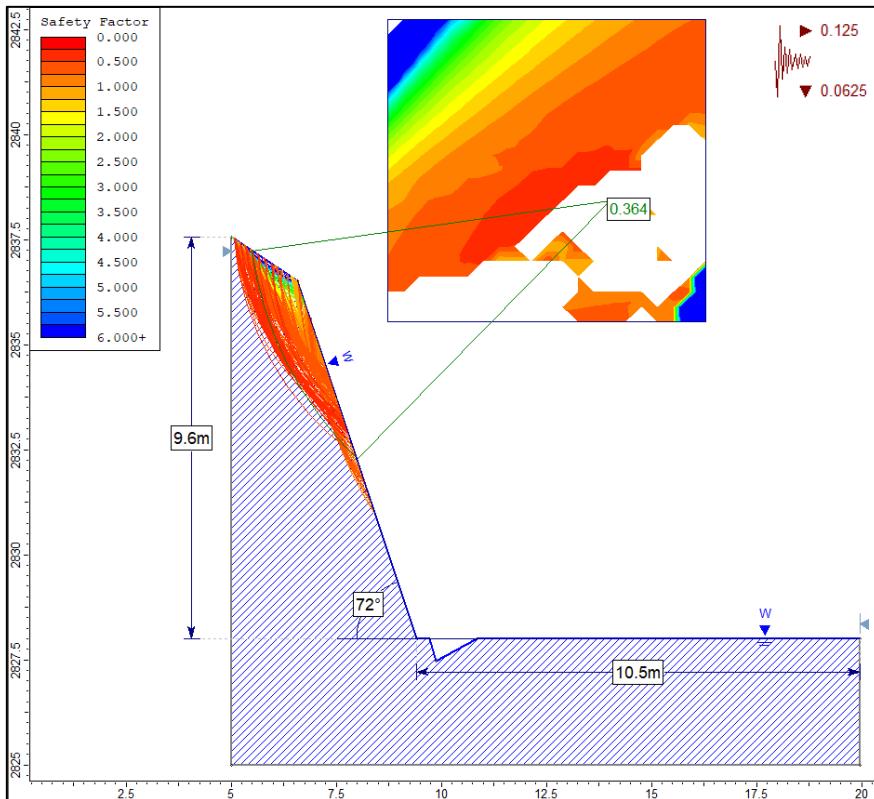


Figura 31: Factor de seguridad SM-02 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

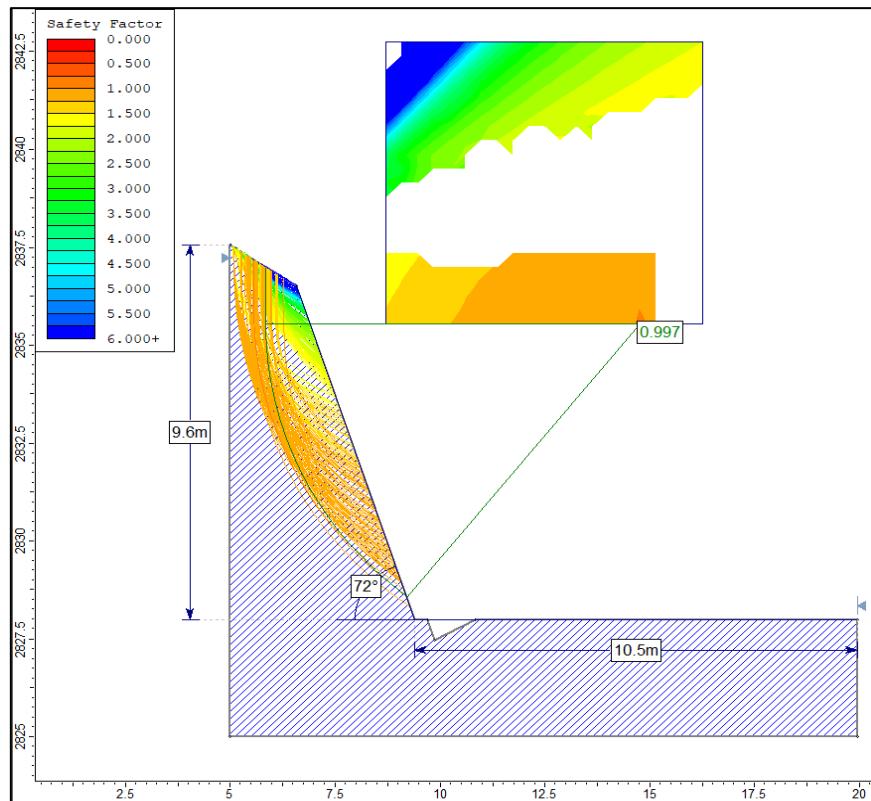


Figura 32: Factor de seguridad SM-02 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales

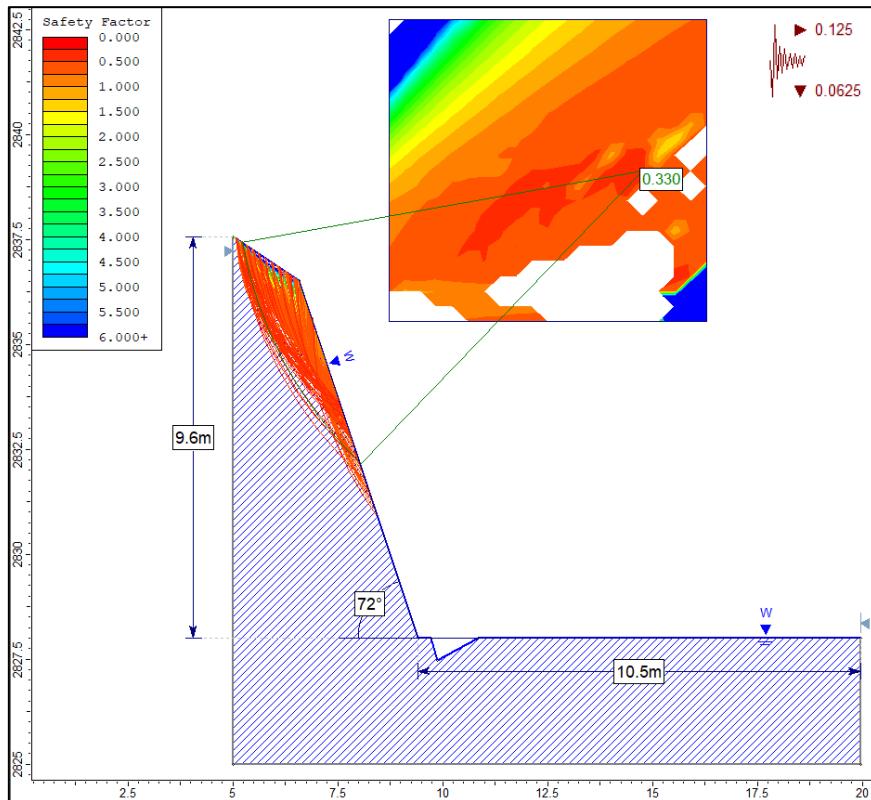


Figura 33: Factor de seguridad SM-02 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

3.8.3. Estación Geotécnica SM – 03

Se tiene cambio de litología a la Formación Chimú, caracterizándose por la presencia de areniscas cuarzosas de grano grueso a medio (Ver Plano 05), con una pendiente de 70° y una altura de 4.9m (ver Foto 11a), debido a los óxidos presentes. El talud se encuentra conformado por tres familias principales de discontinuidades; moderadamente meteorizados y grado de fracturamiento alto. Se evidencian desprendimientos de rocas en la parte alta del talud (Ver foto 11b) (Ver tabla 17).

COORDENADAS			GEOMETRÍA DEL TALUD			
NORTE	ESTE	COTA	ALTURA	PIE	DIP	DD
9192597m	808507m	2755m.s.n.m.	4.9m	10m	70°	310°



Foto 11: Geometría del talud SM-03(a). Familias del talud SM-03(b).

Cálculo del RQD

Se realizó mediante la ecuación: $RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$

Donde: $\lambda = ND/L = 97$

$ND = 34$ y $L = 2$

Se obtiene $RQD = 49.32$

- $\lambda =$ Espaciamiento Promedio entre Discontinuidades
- $ND =$ Número de discontinuidades
- $RQD =$ Designación de Calidad de Roca

Cálculo del RMR89

Se calculó el RMR89 obteniendo como resultado el valor de **58** dando una clasificación geomecánica Tipo III - Calidad Media (ver Tabla 17).

Tabla 16: Asignación de valores para el macizo rocoso, Estación SM- 03.

SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR				
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES		Rango de Valores										
1	Resistencia de la roca intacta	Indice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	7				
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa					
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0				
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		8				
	Valoración	20	17	13	8	3						
3	Espaciado de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm		10				
	Valoración	20	15	10	8	5						
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura de 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas		10				
	Valoración	30	25	20	10	0						
	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125					
5		Presión de agua/o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		10			
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo					
		Valoración	15	10	7	4	0					
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES												
Longitud de las discontinuidades-persistencia		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m						
Valoración		6	4	2	1	0						
Separación (apertura)		Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm						
Valoración		6	5	4	1	0						
Rugosidad		Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla						
Valoración		6	5	3	1	0						
Relleno ()		Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm						
Valoración		6	4	2	1	0						
Intemperización		Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta						
Valoración		6	5	3	1	0						
CLASIFICACION	Puntuacion	(81 - 100)	(61 - 80)	(41 - 60)	(21 - 40)	(<20)						
	Clase	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V						
	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala							
VALOR TOTAL RMR		58		TIPO DE ROCA	Media							

Cálculos en el software RocData

Se hizo uso del software RocData, para obtener las propiedades y parámetros geomecánicos del macizo rocoso, tal como se muestra en la Figura 34.

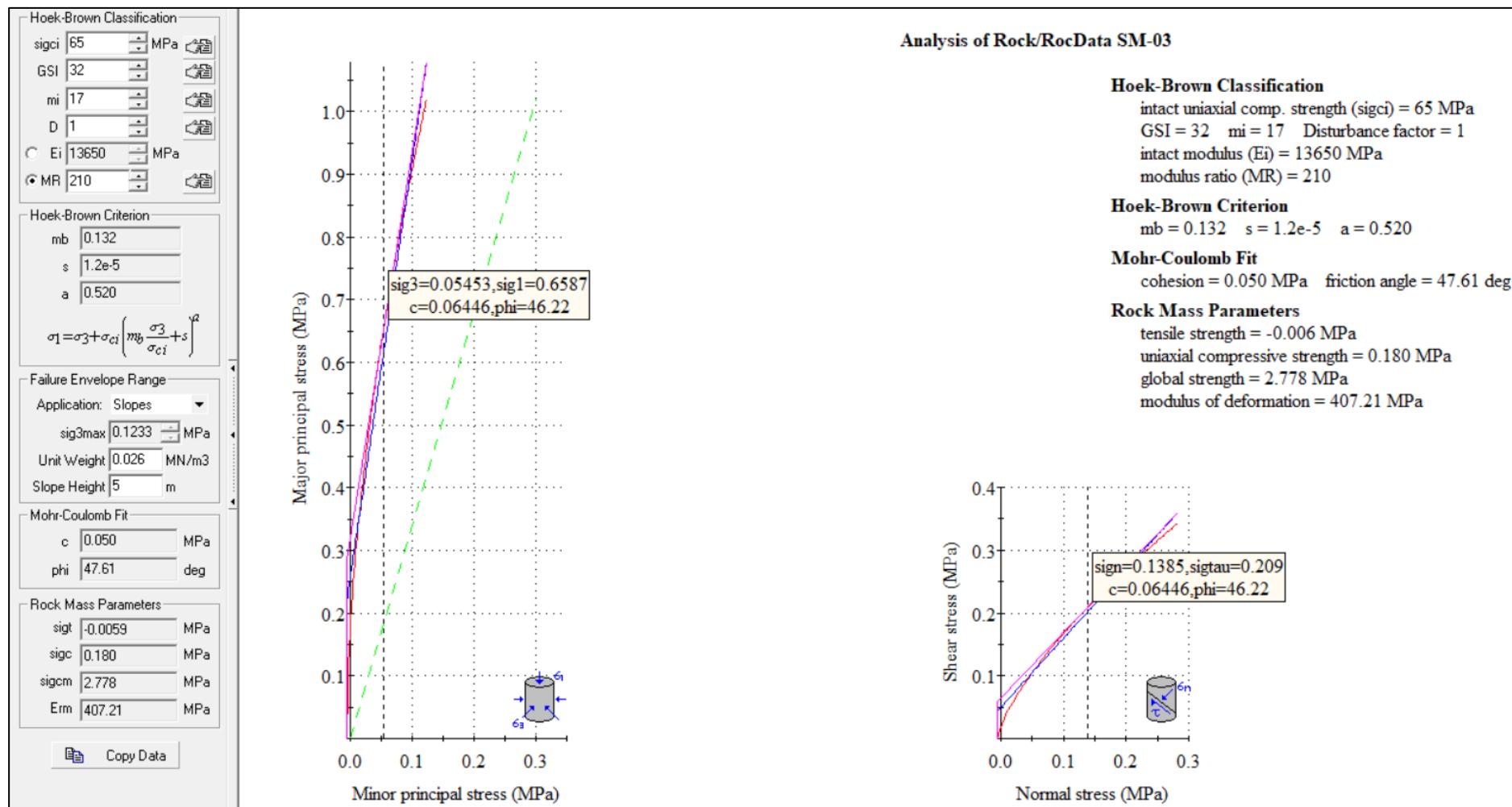


Figura 34: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-03

Diseño en el Software Dips v7.0

El análisis cinemático se realizó a través de proyecciones estereográficas de las discontinuidades evidenciadas en campo en la Estación SM-03; definiendo qué: en el diagrama de polos y círculos máximos, contorno de distribución de Fisher; respecto al talud, ángulo de fricción y zona de riesgo de falla; el macizo rocoso muestra probabilidad de 0.00% de rotura planar (Ver figura 35 (a)); 2.38% probabilidad de rotura en cuña. (Ver Figura 35 (b)).

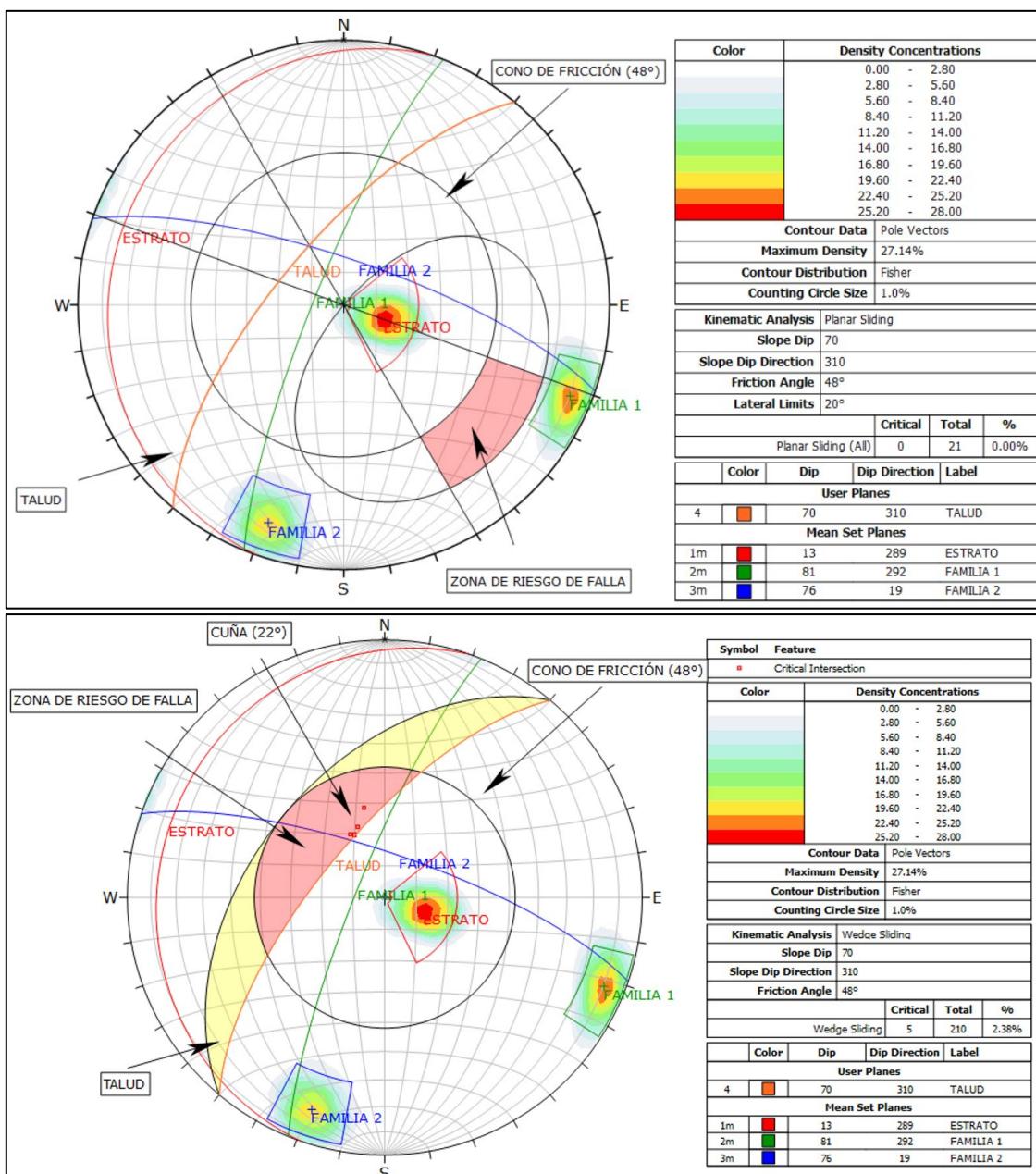


Figura 35: Estación SM-03, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).

Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0

Los métodos utilizados para poder calcular el factor de seguridad fueron: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado LE/Morgenstern-Price, y Spencer; el número de dovelas fueron 30, tolerancia 0.005 y un máximo de 50 iteraciones y el método de búsqueda de la falla crítica fue de “Grid Search”.

El cálculo del FS se realizó en condiciones normales y condiciones efectivas más sismicidad, considerando la aceleración sísmica máxima de 0.25; coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.125 (Kh) y coeficiente de aceleración máximo vertical de 0.0625 (Kv). El resultado del Análisis se muestra en la Tabla 18, donde se determina que el Talud de la estación SM-03 presenta inestabilidad.

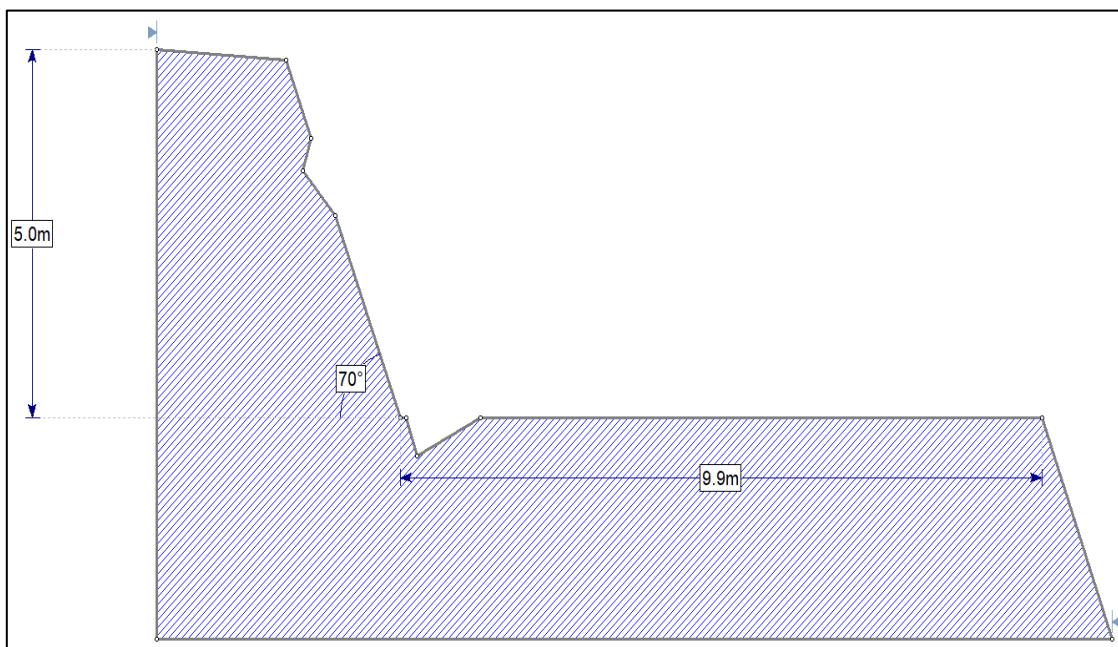


Figura 36: Estación SM-03, dimensiones del Talud.

Tabla 17: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-03.

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	1.002	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.038	Inestable
Janbu simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	0.983	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.005	Inestable
Spencer	Condiciones de Tensiones Totales	0.998	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.097	Inestable
Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	1.000	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.103	Inestable

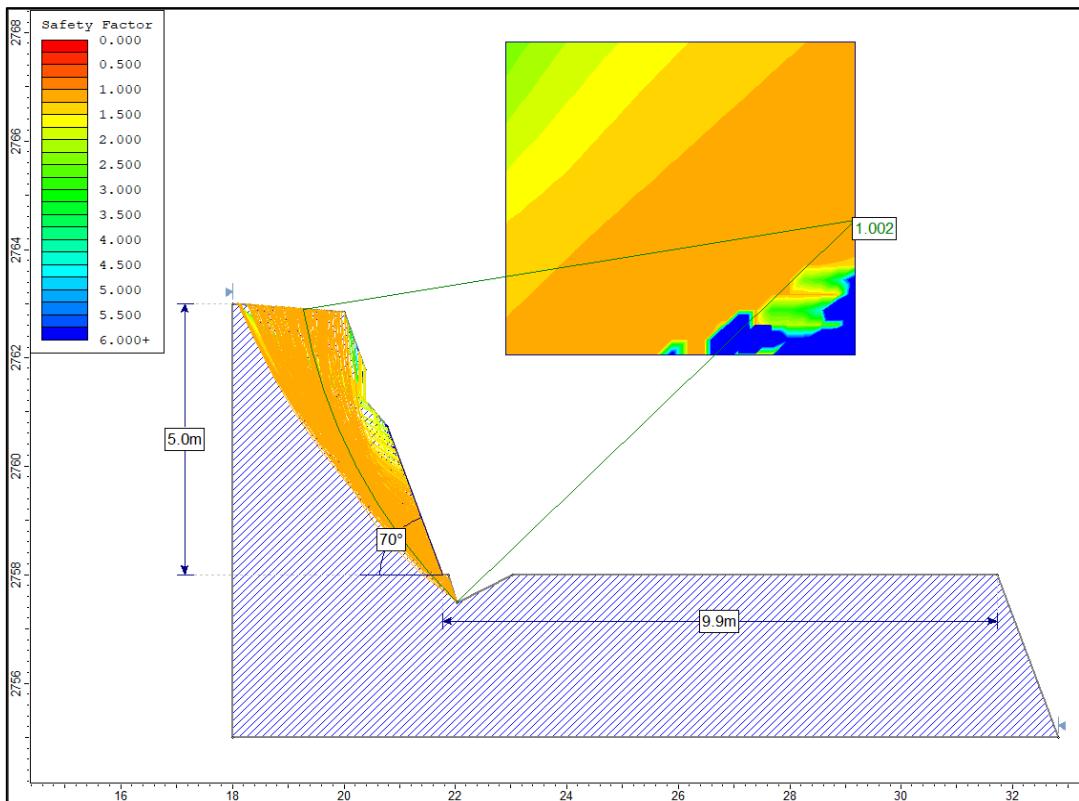


Figura 37: Factor de seguridad SM-03 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

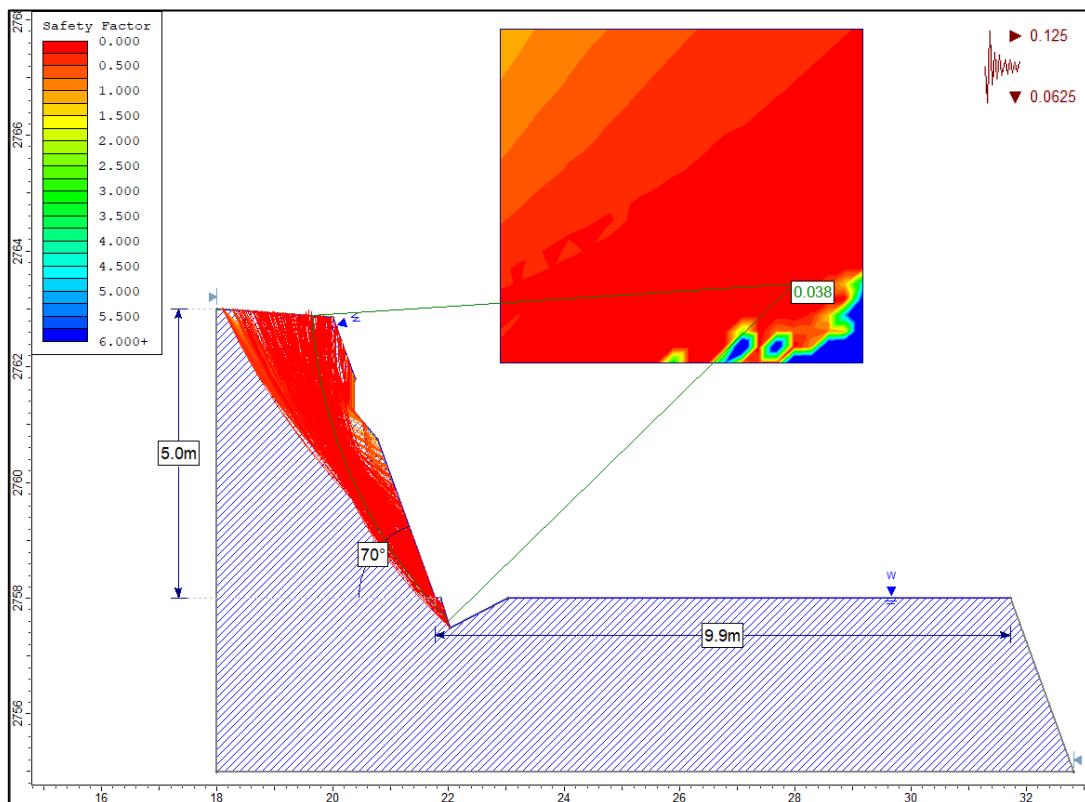


Figura 38: Factor de seguridad SM-03 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

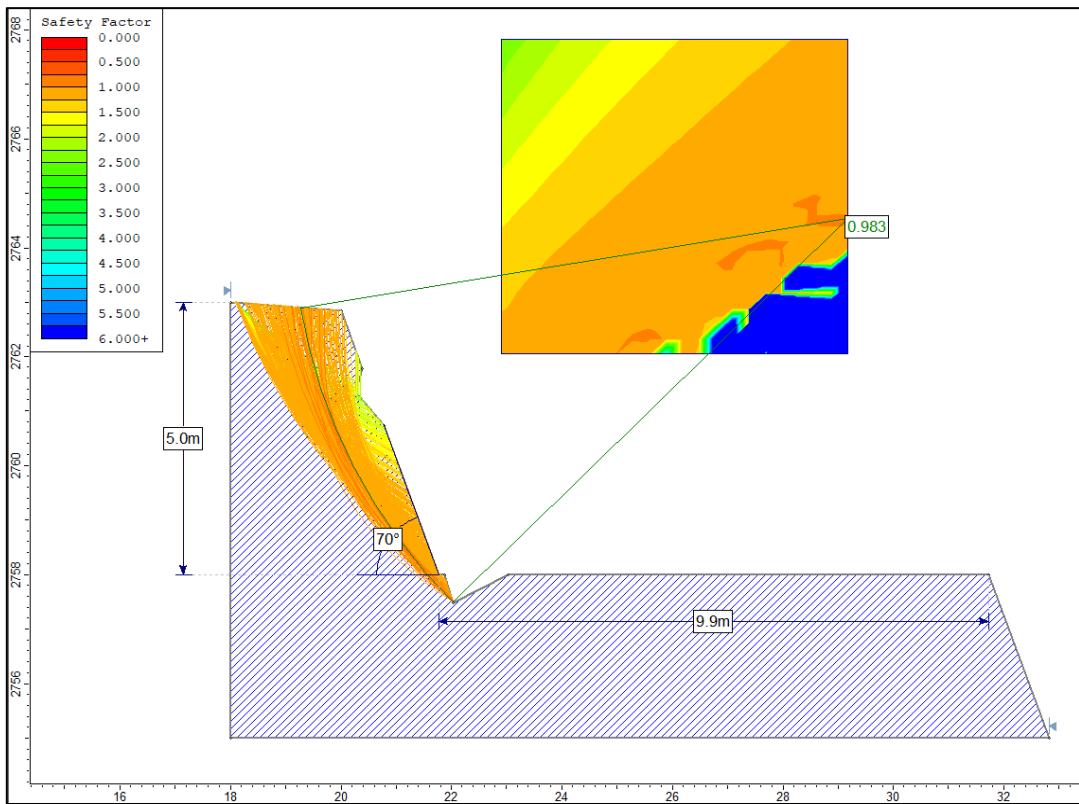


Figura 39: Factor de seguridad SM-03 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

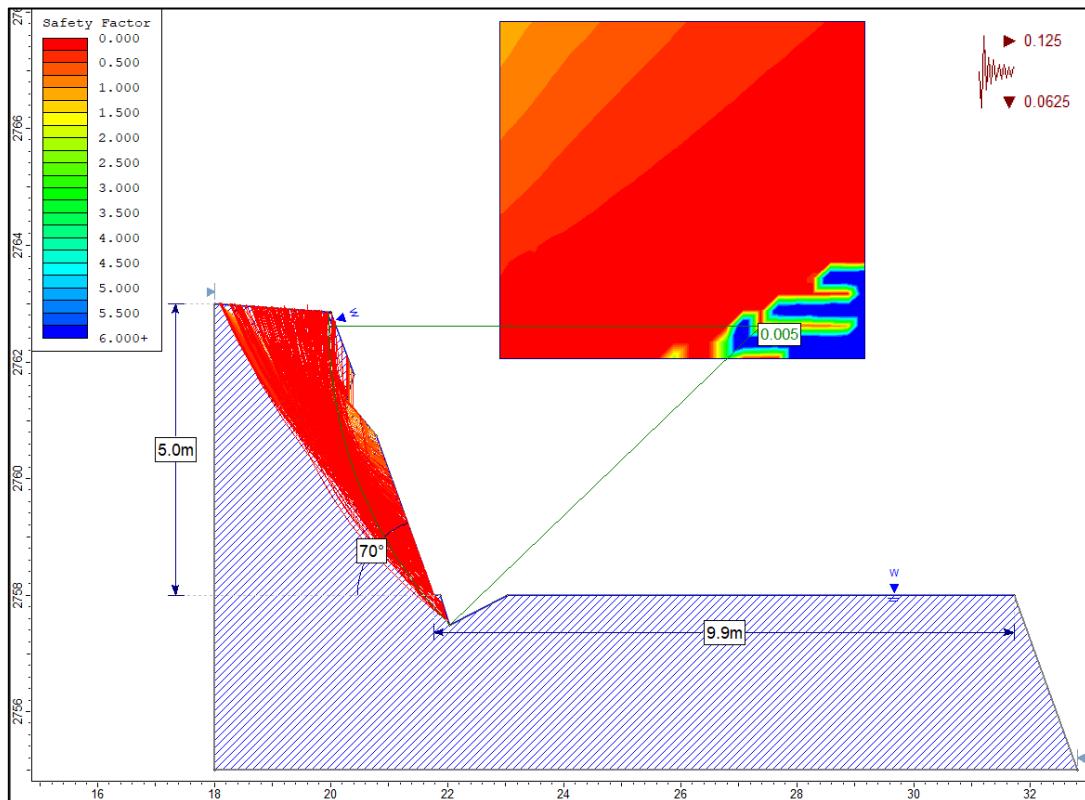


Figura 40: Factor de seguridad SM-03 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

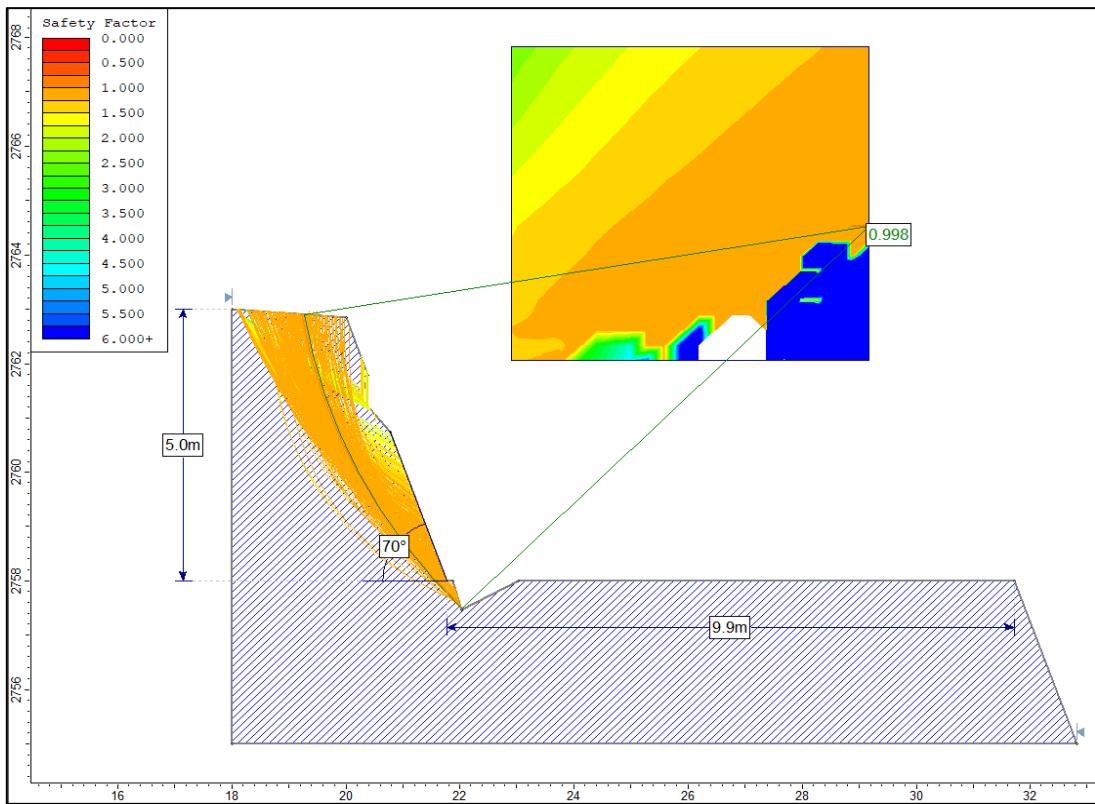


Figura 41: Factor de seguridad SM-03 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales

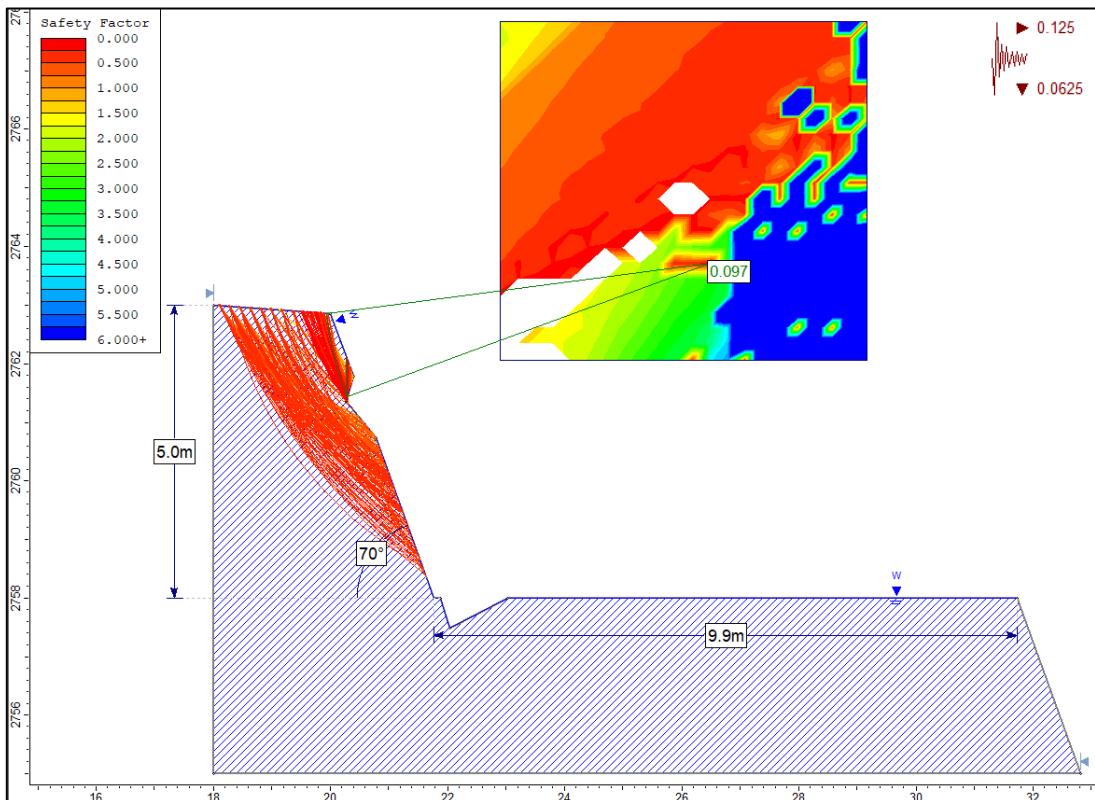


Figura 42: Factor de seguridad SM-03 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

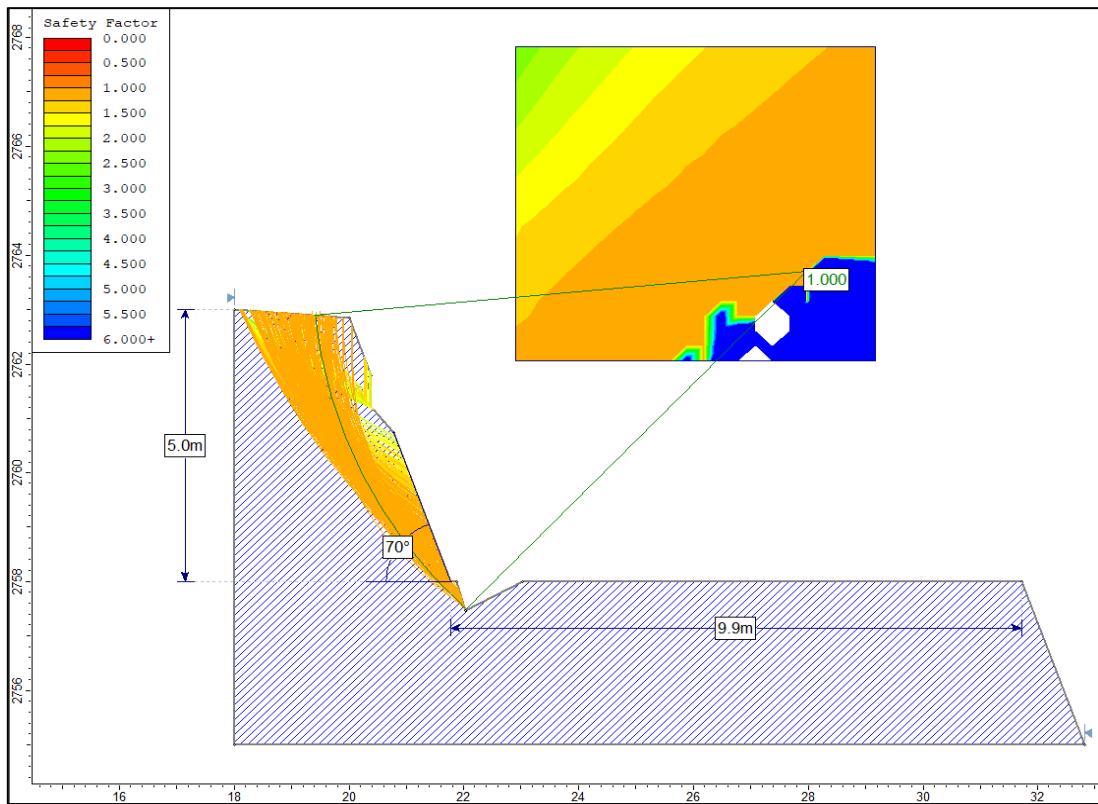


Figura 43: Factor de seguridad SM-03 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales (Condiciones normales)

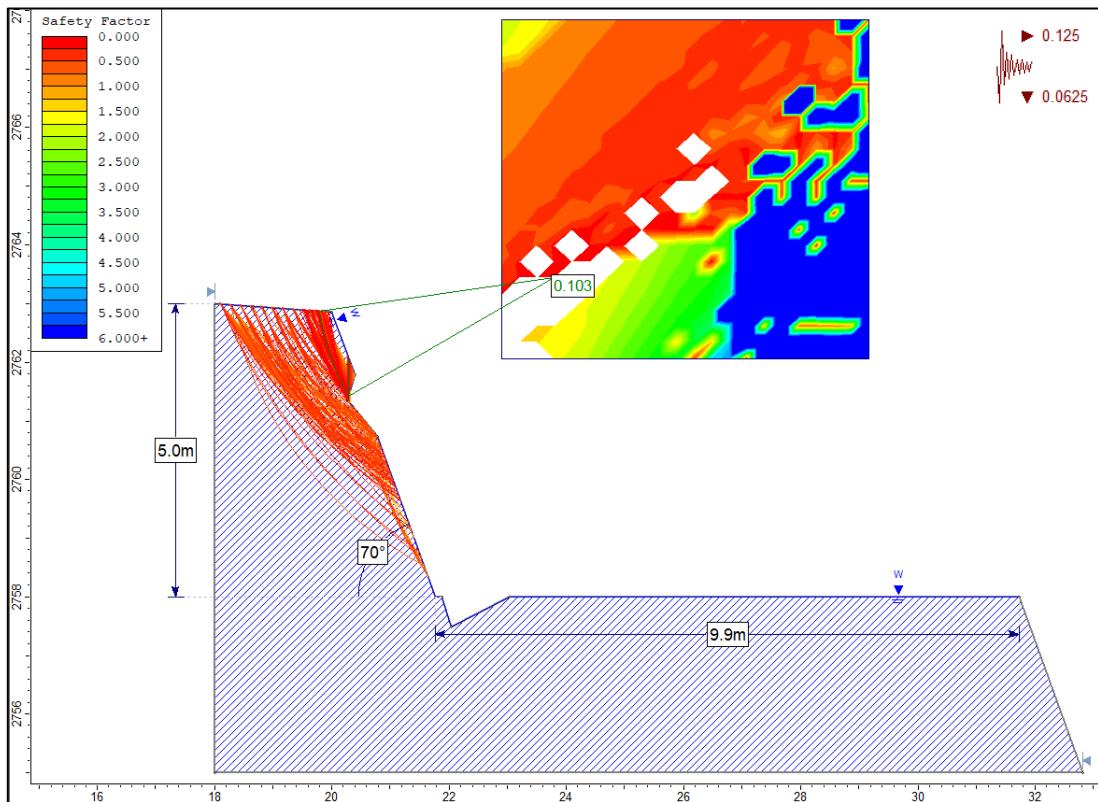


Figura 44: Factor de seguridad SM-03 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

3.8.4. Estación Geotécnica SM – 04

Se continua con la Formación Chimú, con la presencia de areniscas cuarzosas de grano medio a fino con una tonalidad blanquecina (Ver Plano 05), con fracturas delgadas con una coloración rojiza a parda, debido a los óxidos presentes. El talud presenta una pendiente de 67° , con una altura de 5.8m (Ver Foto 12a); se encuentra conformado por tres familias principales de discontinuidades; moderadamente meteorizadas y con grado de fracturamiento alto (Ver Foto 12b).

COORDENADAS			GEOMETRÍA DEL TALUD			
NORTE	ESTE	COTA	ALTURA	PIE	DIP	DD
9192478m	809060m	2716m.s.n.m.	5.8m	10.9m	66°	310°



Foto 12: Geometría del talud SM-04(a). Familias del talud SM-04(b).

Cálculo del RQD

Se realizó mediante la ecuación: $RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$

Donde: $\lambda = ND/L = 12.2$

$ND = 28$ y $L = 2.3$

Se obtiene $RQD = 65.5$

- $\lambda =$ Espaciamiento Promedio entre Discontinuidades
- $ND =$ Número de discontinuidades
- $RQD =$ Designación de Calidad de Roca

Cálculo del RMR89

Se calculó el RMR89 obteniendo como resultado el valor de **70** dando una clasificación geomecánica Tipo II - Calidad Buena (ver Tabla 19).

Tabla 18: Asignación de valores para el macizo rocoso, Estación SM- 04.

SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR		
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES		Rango de Valores								
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	12		
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa 1- Mpa < 1 Mpa			
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0		
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%				
	Valoración	20	17	13	8	3				
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm				
	Valoración	20	15	10	8	5				
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura de 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas				
		30	25	20	10	0				
	Valoración	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125			
5	Agua Subterránea	Presión de agua/o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5			
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
	Valoración	15	10	7	4	0				
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES										
Longitud de las discontinuidades-persistencia		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m				
Valoración		6	4	2	1	0				
Separación (apertura)		Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm				
Valoración		6	5	4	1	0				
Rugosidad		Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla				
Valoración		6	5	3	1	0				
Relleno ()		Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm				
Valoración		6	4	2	1	0				
Intemperización		Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta				
Valoración		6	5	3	1	0				
CLASIFICACION	Puntuacion	(81 - 100)	(61 - 80)	(41 - 60)	(21 - 40)	(<20)				
	Clase	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V				
		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala				
VALOR TOTAL RMR		70		TIPO DE ROCA	Buena					

Cálculos en el software RocData

Se hizo uso del software RocData, para obtener las propiedades y parámetros geomecánicos del macizo rocoso, tal como se muestra en la Figura 45.

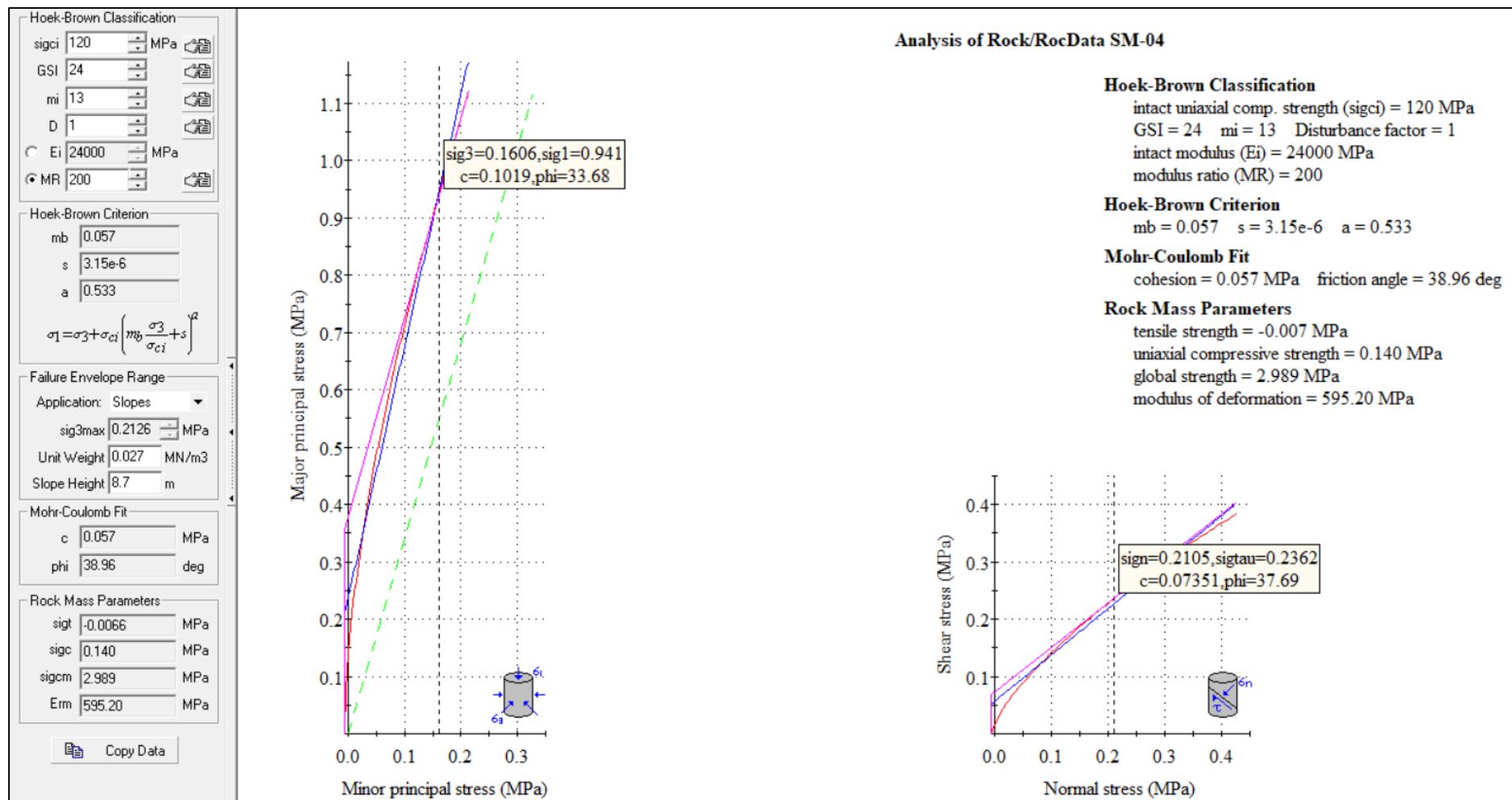


Figura 45: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-04.

Diseño en el Software Dips v7.0

El análisis cinemático se realizó a través de proyecciones estereográficas de las discontinuidades evidenciadas en campo en la Estación SM-04; definiendo qué: en el diagrama de polos y círculos máximos, contorno de distribución de Fisher; respecto al talud, ángulo de fricción y zona de riesgo de falla; el macizo rocoso muestra probabilidad de 19.05% de rotura planar (Ver figura 46 (a)); 25.71% probabilidad de rotura en cuña. (Ver Figura 46 (b)).

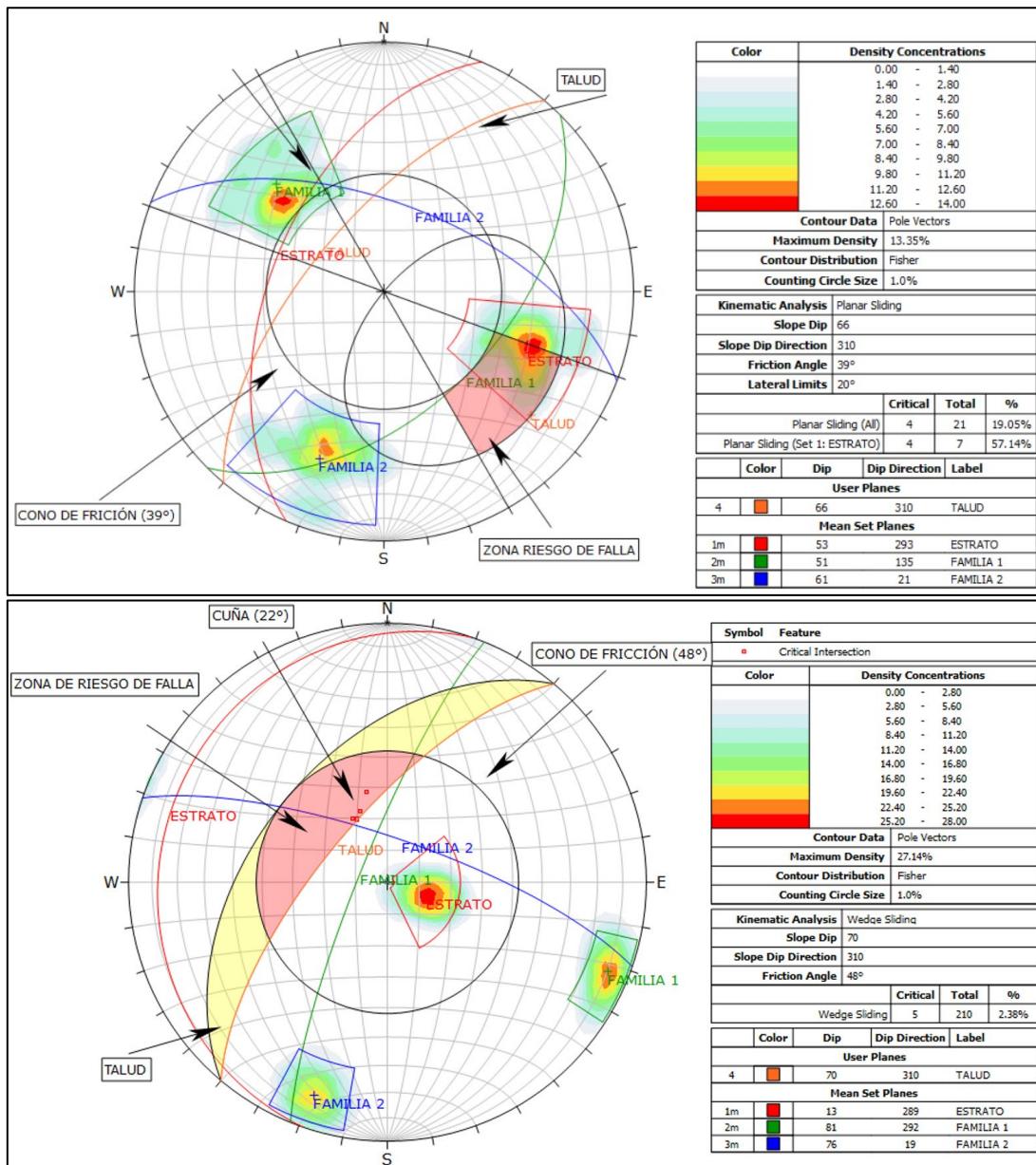


Figura 46: Estación SM-04, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).

Interpretación: El análisis cinemático revela una rotura en cuña bien definida, con la intersección de dos conjuntos de diaclasas que forman un ángulo agudo orientado hacia el talud. Aunque la rotura planar es también posible, la rotura en cuña presenta la mayor probabilidad, en torno al 20%. Esto indica que la interacción entre las estructuras es el principal mecanismo de falla en esta estación.

Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0

Los métodos utilizados para poder calcular el factor de seguridad fueron: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado LE/Morgenstern-Price, y Spencer; el número de dovelas fueron 30, tolerancia 0.005 y un máximo de 50 iteraciones y el método de búsqueda de la falla crítica fue de “Grid Search”.

El cálculo del FS se realizó en condiciones normales y condiciones efectivas más sismicidad, considerando la aceleración sísmica máxima de 0.25; coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.125 (Kh) y coeficiente de aceleración máximo vertical de 0.0625 (Kv). El resultado del Análisis se muestra en la Tabla 20, donde se determina que el Talud de la estación SM-04 presenta inestabilidad.

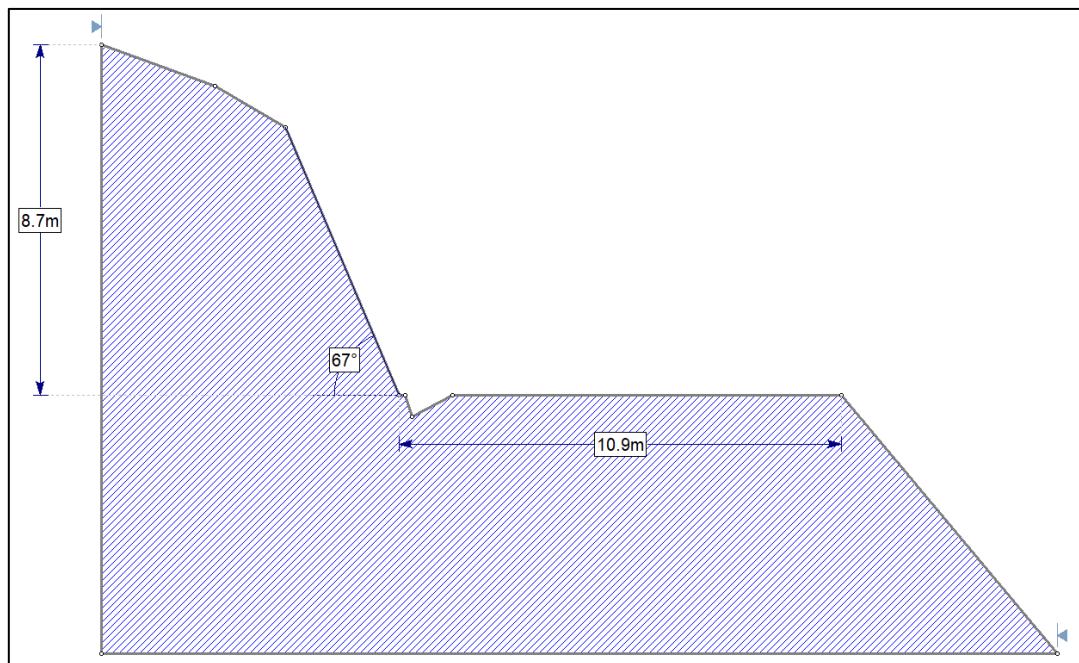


Figura 47: Estación SM-04, dimensiones del Talud.

Tabla 19: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-04.

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	0.820	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.086	Inestable
Janbu simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	0.796	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.023	Inestable
Spencer	Condiciones de Tensiones Totales	0.817	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.222	Inestable
Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	0.814	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.211	Inestable

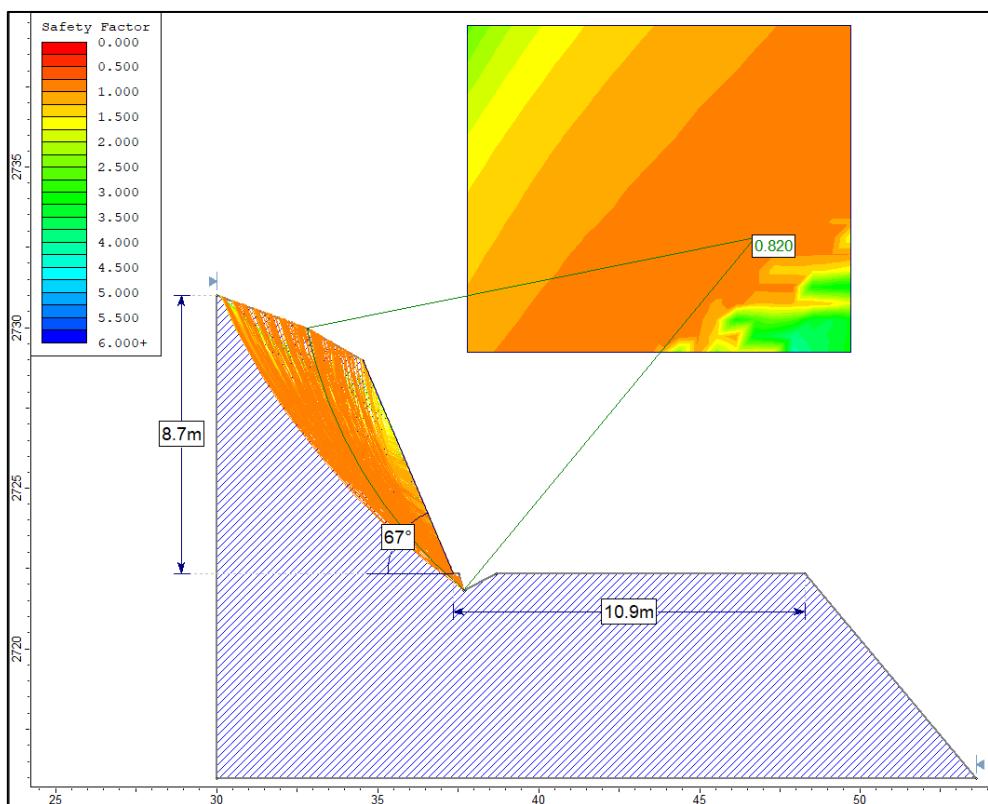


Figura 48: Factor de seguridad SM-04 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

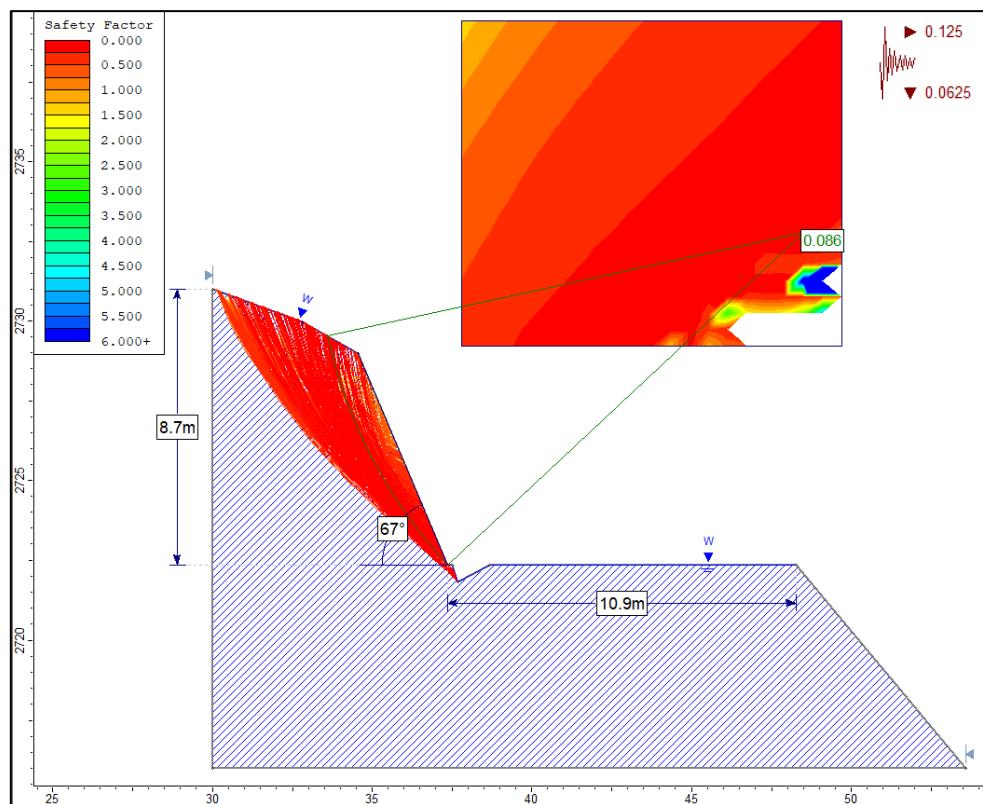


Figura 49: Factor de seguridad SM-04 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

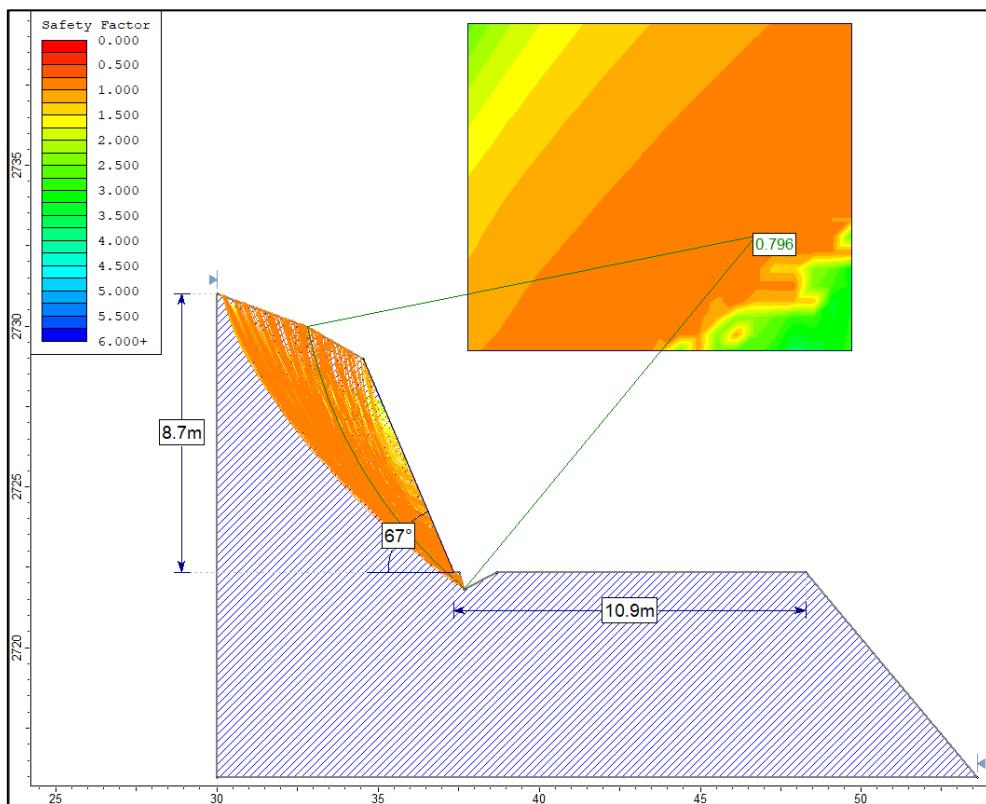


Figura 50: Factor de seguridad SM-04 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

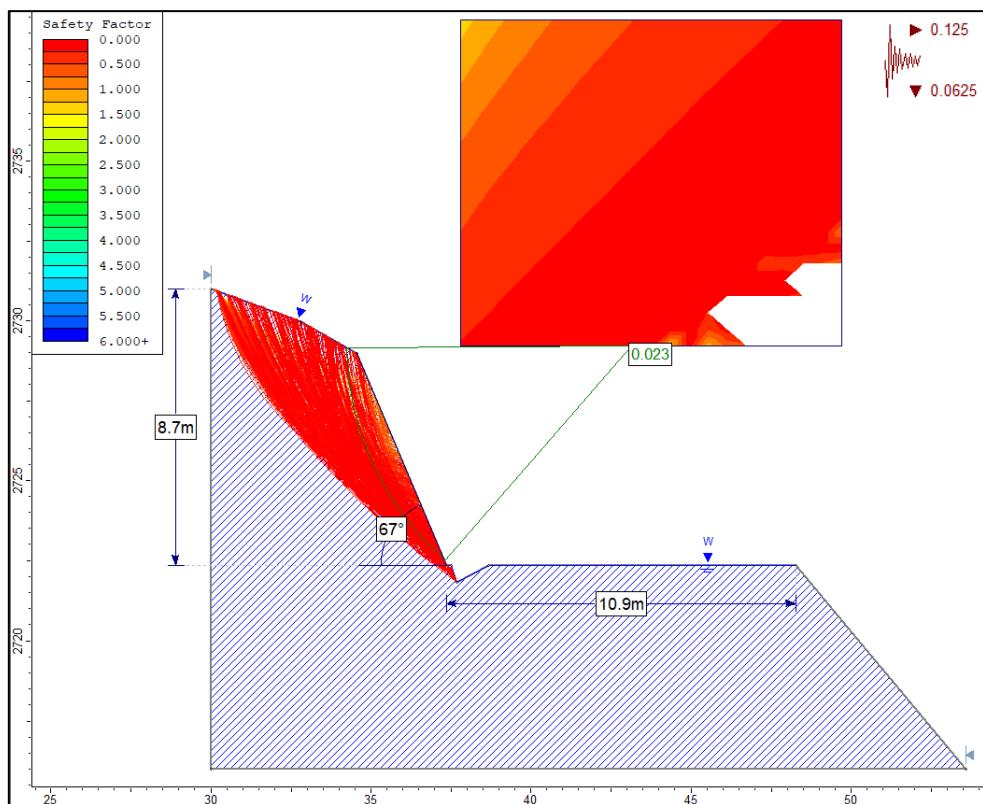


Figura 51: Factor de seguridad SM-04 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

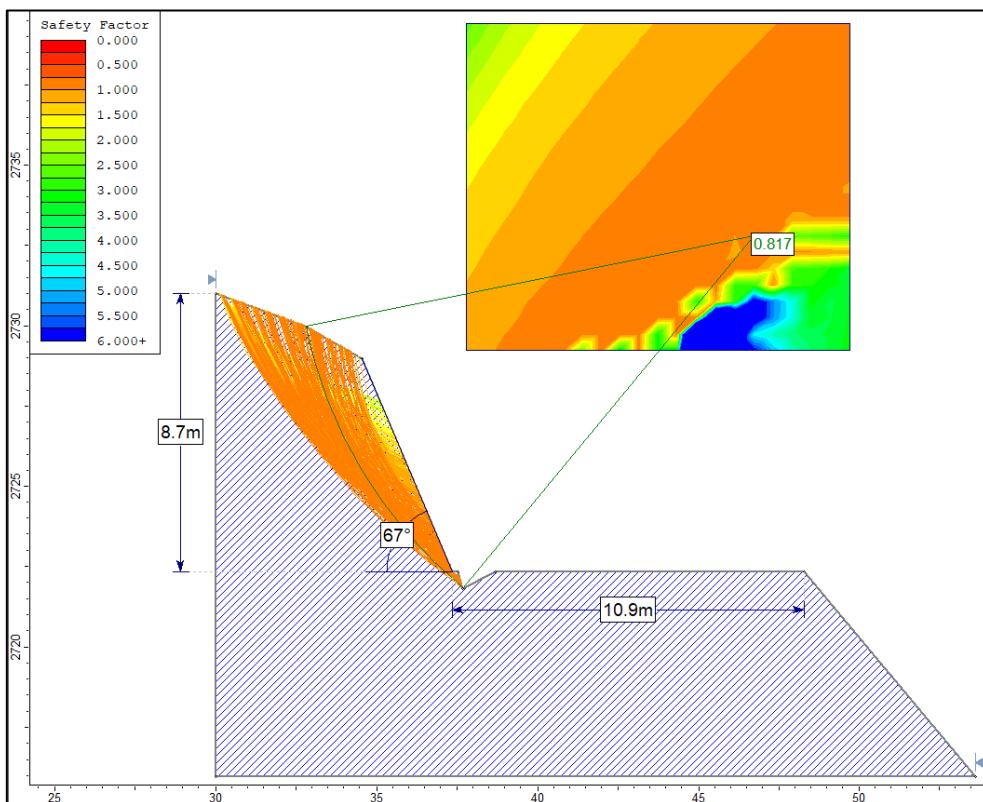


Figura 52: Factor de seguridad SM-04 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales

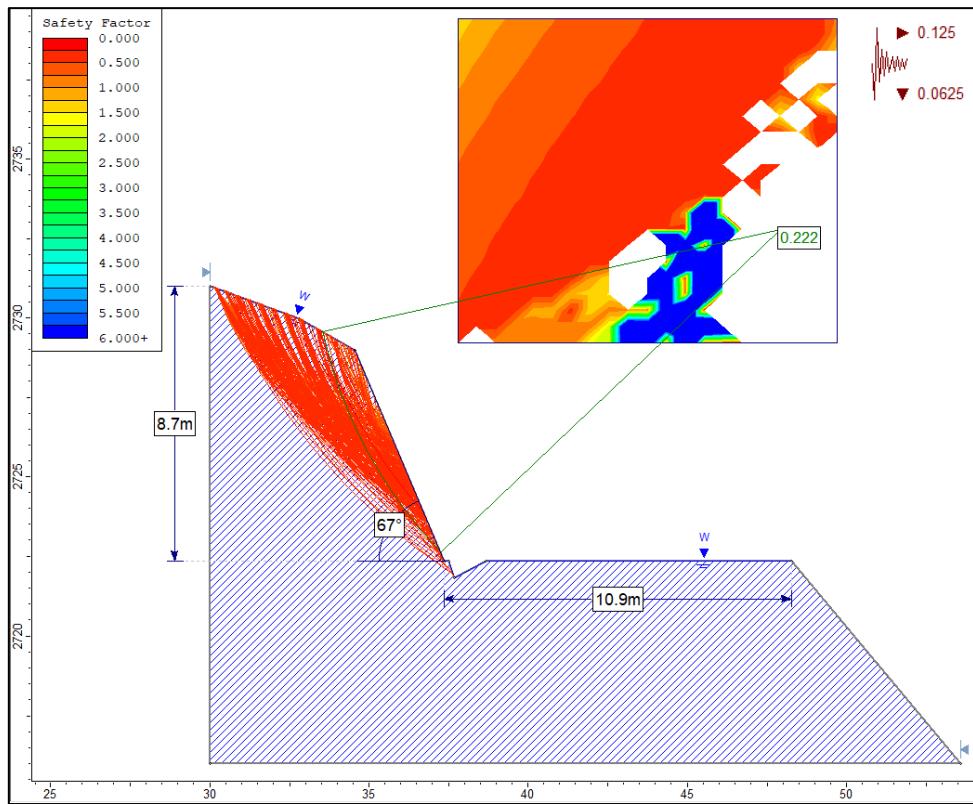


Figura 53: Factor de seguridad SM-04 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

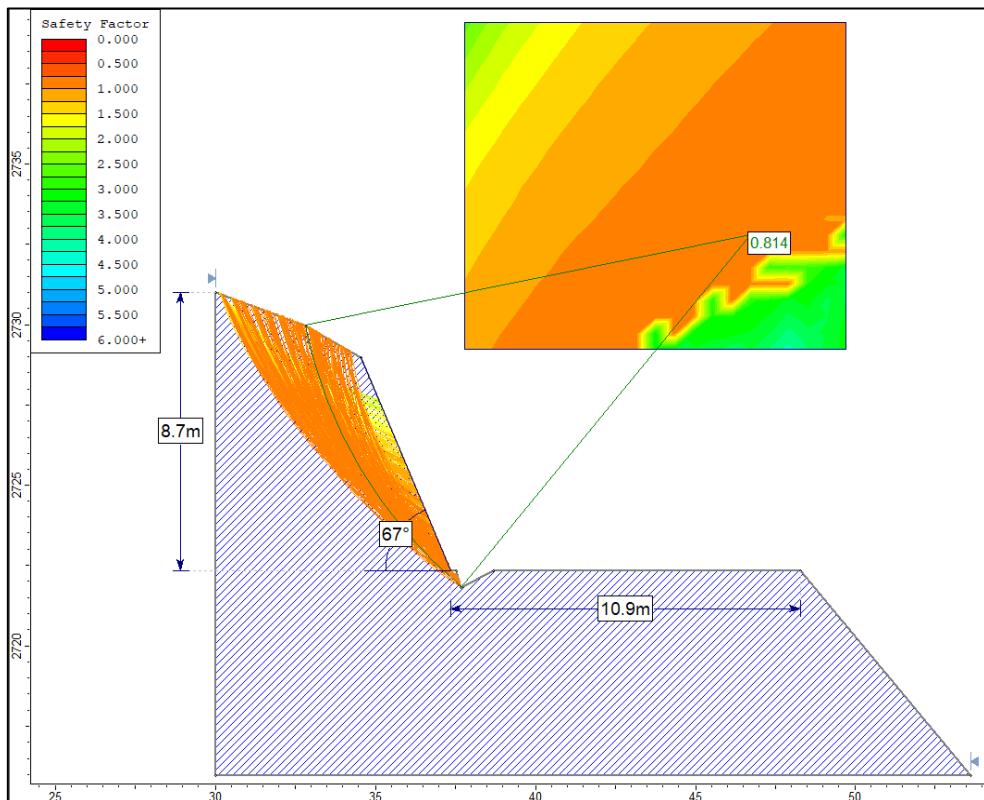


Figura 54: Factor de seguridad SM-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales

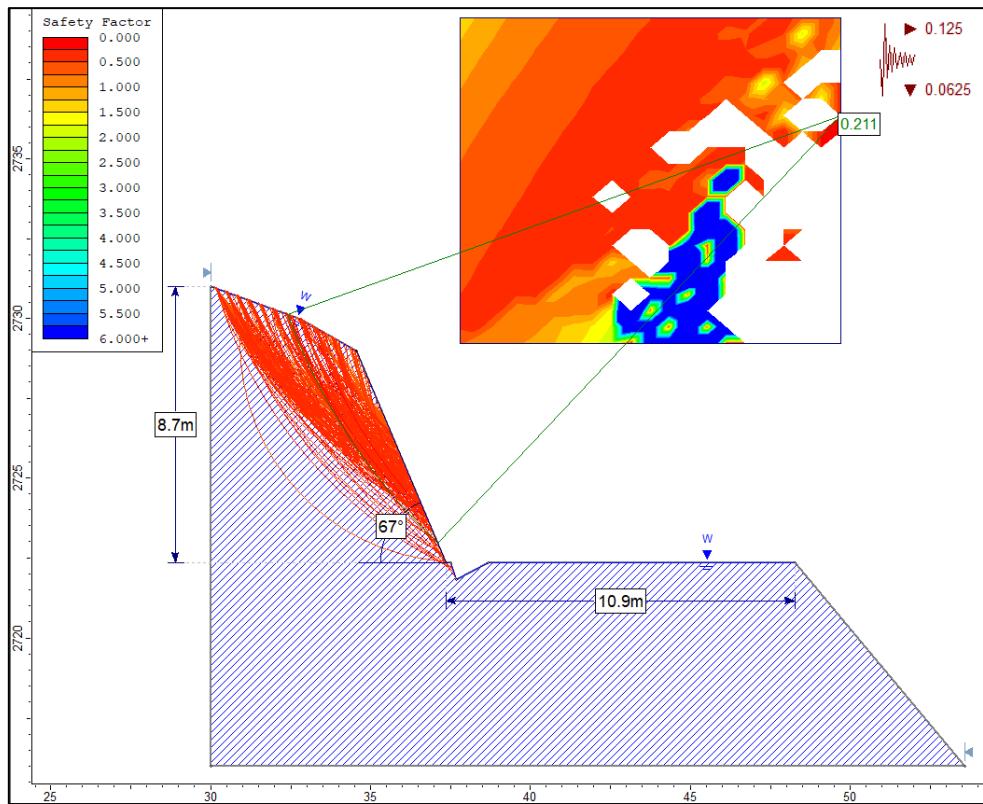


Figura 55: Factor de seguridad SM-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

3.8.5. Estación Geotécnica SM – 05

Se tiene cambio de litología a la Formación Carhuaz (Ver Plano 05), caracterizándose por la presencia de areniscas de grano medio a fino con una tonalidad parda oscura, con una coloración y con fracturas con óxidos. Este talud presenta una pendiente de 85° y una altura de 6.5m (Ver Foto 13a); conformado por tres familias principales de discontinuidades; moderadamente meteorizados en la totalidad de sus caras y con grado de fracturamiento alto (Ver Foto 13b).

COORDENADAS			GEOMETRÍA DEL TALUD			
NORTE	ESTE	COTA	ALTURA	PIE	DIP	DD
9190245m	810237m	2536m.s.n.m.	6.5m	10.25m	84°	145°



Foto 13: Geometría del talud SM-05(a). Familias del talud SM-05(b).

Cálculo del RQD

Se realizó mediante la ecuación: $RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$

Donde: $\lambda = ND/L = 11$

$ND = 23$ y $L = 2.1$

Se obtiene $RQD = 75.41$

- $\lambda = \text{Espaciamiento Promedio entre Discontinuidades}$
- $ND = \text{Número de discontinuidades}$
- $RQD = \text{Designación de Calidad de Roca}$

Cálculo del RMR89

Se calculó el RMR89 obteniendo como resultado el valor de **62** dando una clasificación geomecánica Tipo II - Calidad Buena (ver Tabla 21).

Tabla 20: Asignación de valores para el macizo rococo, Estación SM- 05.

SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA – RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR		
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES		Rango de Valores								
Parámetros		Indice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	12		
1	Resistencia de la roca intacta	Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa 1- Mpa < 1 Mpa			
		Valoración	15	12	7	4	2 1 0			
		Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%			
2		Valoración	20	17	13	8	3	13		
		Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm			
3		Valoración	20	15	10	8	5	10		
		Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura de 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas			
4		Valoración	30	25	20	10	0			
		Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125			
5	Agua Subterránea	Presión de agua/ o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5	10		
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
		Valoración	15	10	7	4	0			
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES										
Longitud de las discontinuidades-persistencia		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m				
Valoración		6	4	2	1	0				
Separación (apertura)		Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm				
Valoración		6	5	4	1	0				
Rugosidad		Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla				
Valoración		6	5	3	1	0				
Relleno ()		Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm				
Valoración		6	4	2	1	0				
Intemperización		Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta				
Valoración		6	5	3	1	0				
CLASIFICACION	Puntuacion	(81 - 100)	(61 - 80)	(41 - 60)	(21 - 40)	(<20)				
	Clase	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V				
		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala				
VALOR TOTAL RMR		62		TIPO DE ROCA		Buena				

Cálculos en el software RocData

Se hizo uso del software RocData, para obtener las propiedades y parámetros geomecánicos del macizo rocoso, tal como se muestra en la Figura 56.

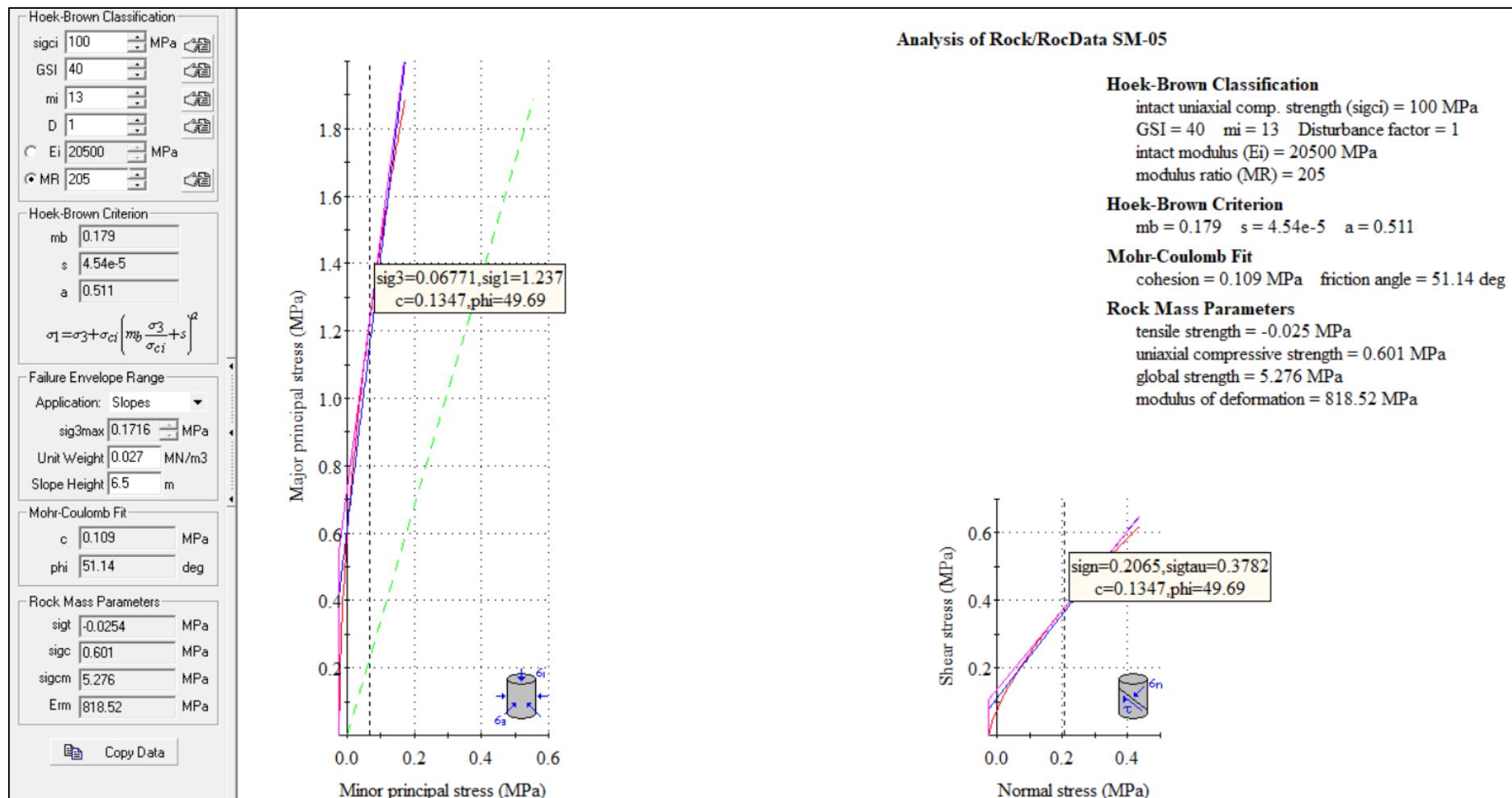


Figura 56: Gráficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-05.

Diseño en el Software Dips v7.0

El análisis cinemático se realizó a través de proyecciones estereográficas de las discontinuidades evidenciadas en campo en la Estación SM-05; definiendo qué: en el diagrama de polos y círculos máximos, contorno de distribución de Fisher; respecto al talud, ángulo de fricción y zona de riesgo de falla; el macizo rocoso muestra probabilidad de 0.00% de rotura planar (Ver figura 57 (a)); 7.14% probabilidad de rotura en cuña. (Ver Figura 57 (b)).

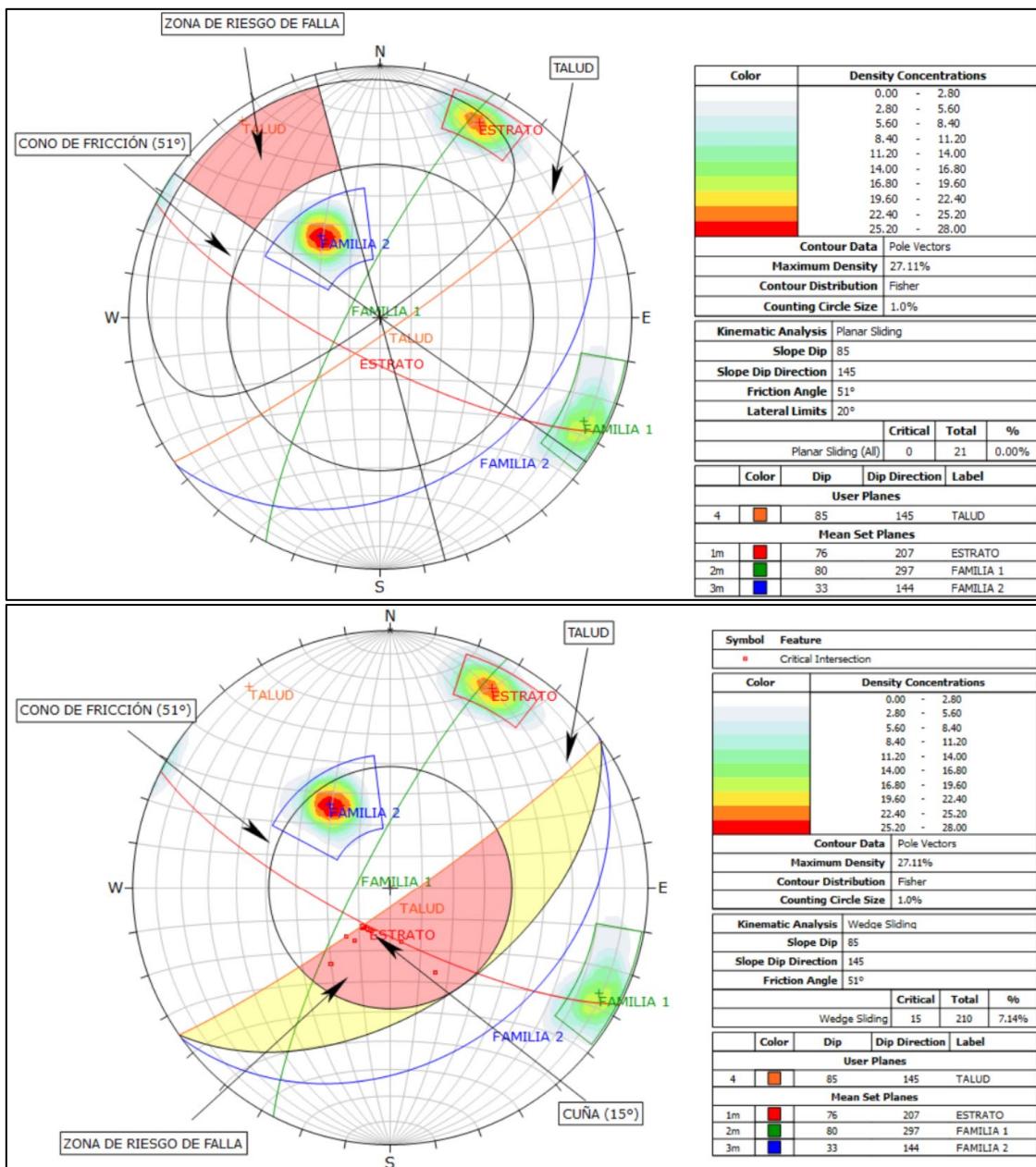


Figura 57: Estación SM-05, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).

Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0

Los métodos utilizados para poder calcular el factor de seguridad fueron: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado LE/Morgenstern-Price, y Spencer; el número de dovelas fueron 30, tolerancia 0.005 y un máximo de 50 iteraciones y el método de búsqueda de la falla crítica fue de “Grid Search”.

El cálculo del FS se realizó en condiciones normales y condiciones efectivas más sismicidad, considerando la aceleración sísmica máxima de 0.25; coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.125 (Kh) y coeficiente de aceleración máximo vertical de 0.0625 (Kv). El resultado del Análisis se muestra en la Tabla 22, donde se determina que el Talud de la estación SM-05 presenta inestabilidad.

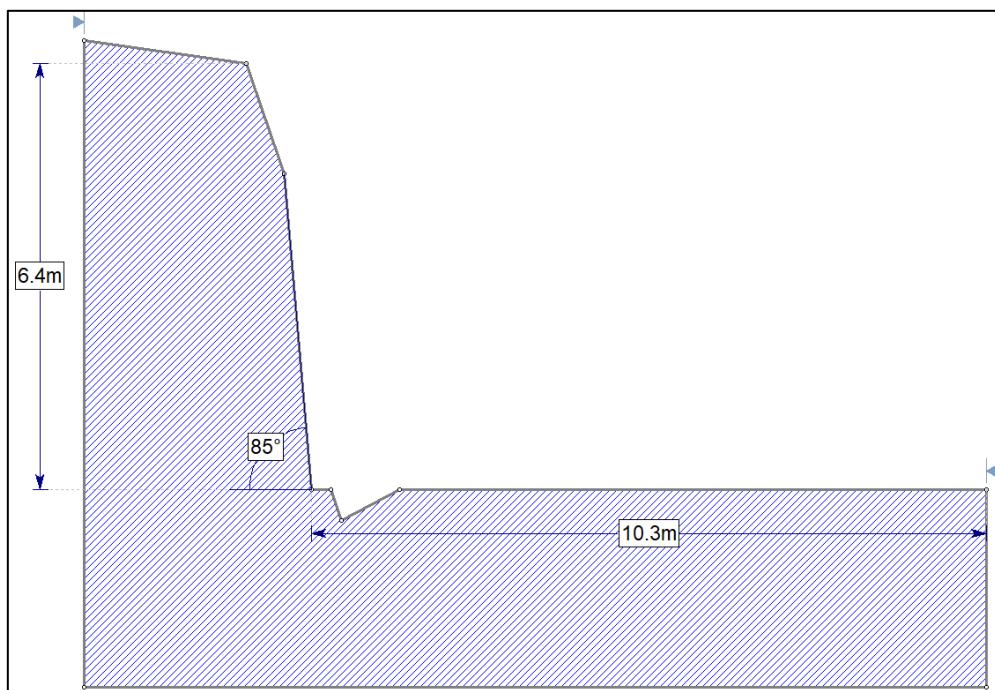


Figura 58: Estación SM-05, dimensiones del Talud.

Tabla 21: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-05.

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	0.957	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.009	Inestable
Janbu simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	0.982	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.001	Inestable
Spencer	Condiciones de Tensiones Totales	0.986	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.005	Inestable
Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	0.994	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.123	Inestable

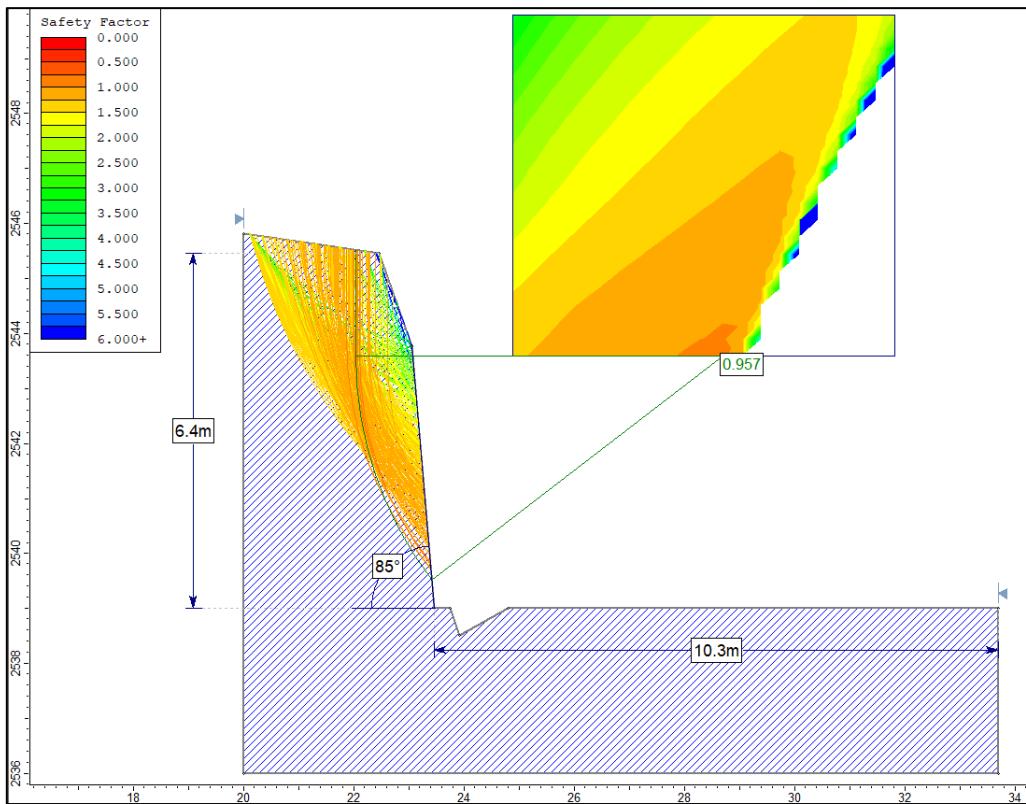


Figura 59: Factor de seguridad SM-05 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

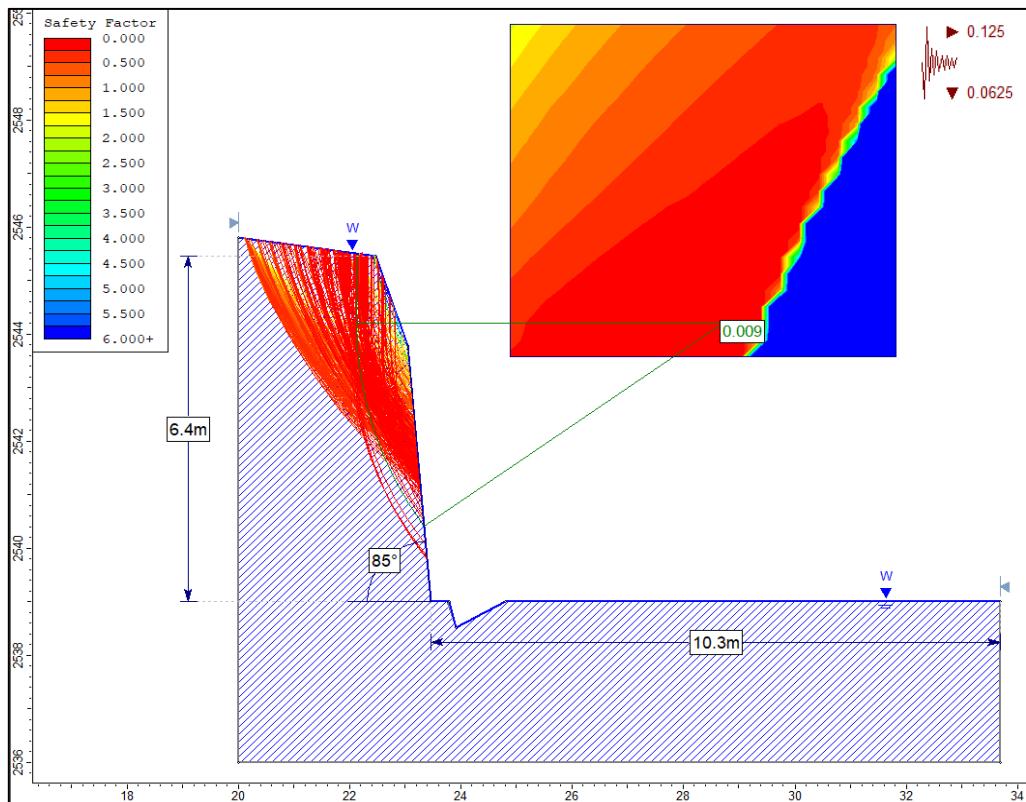


Figura 60: Factor de seguridad SM-05 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

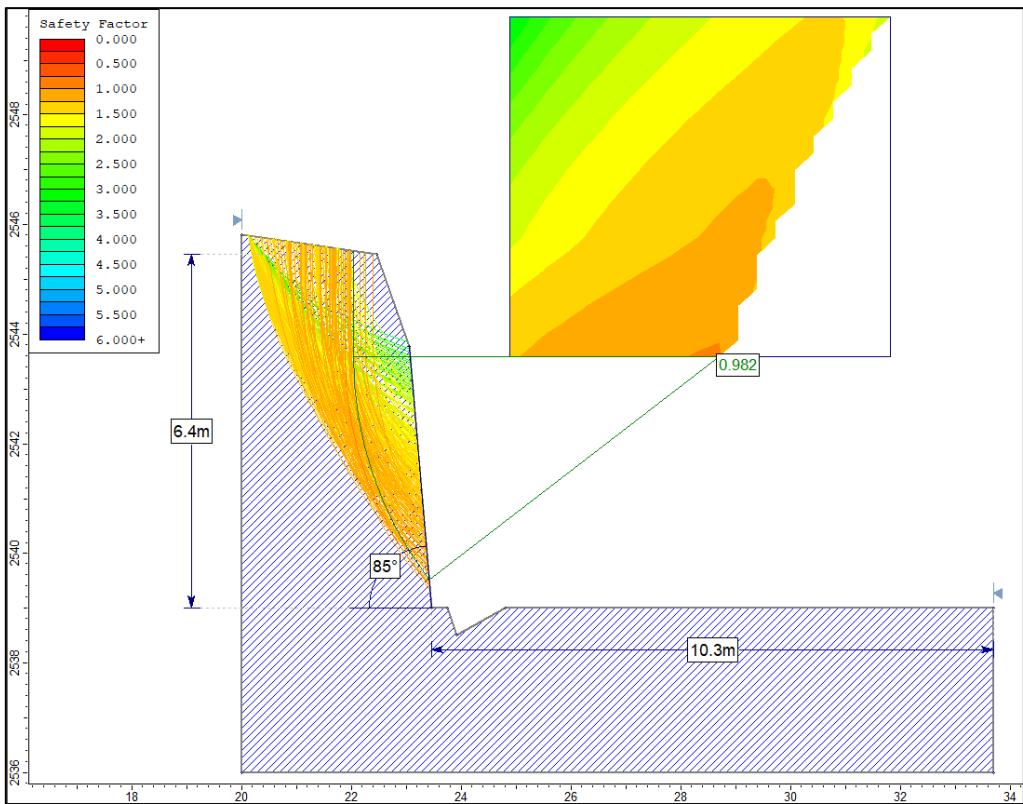


Figura 61: Factor de seguridad SM-05 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

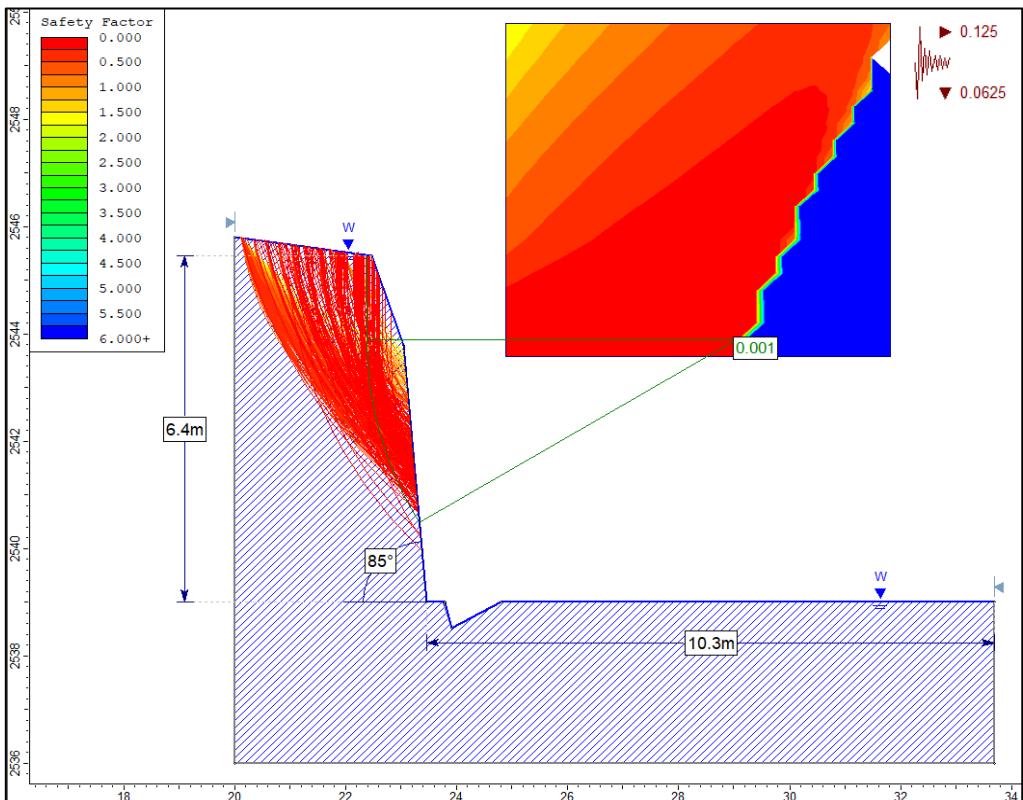


Figura 62: Factor de seguridad SM-05 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

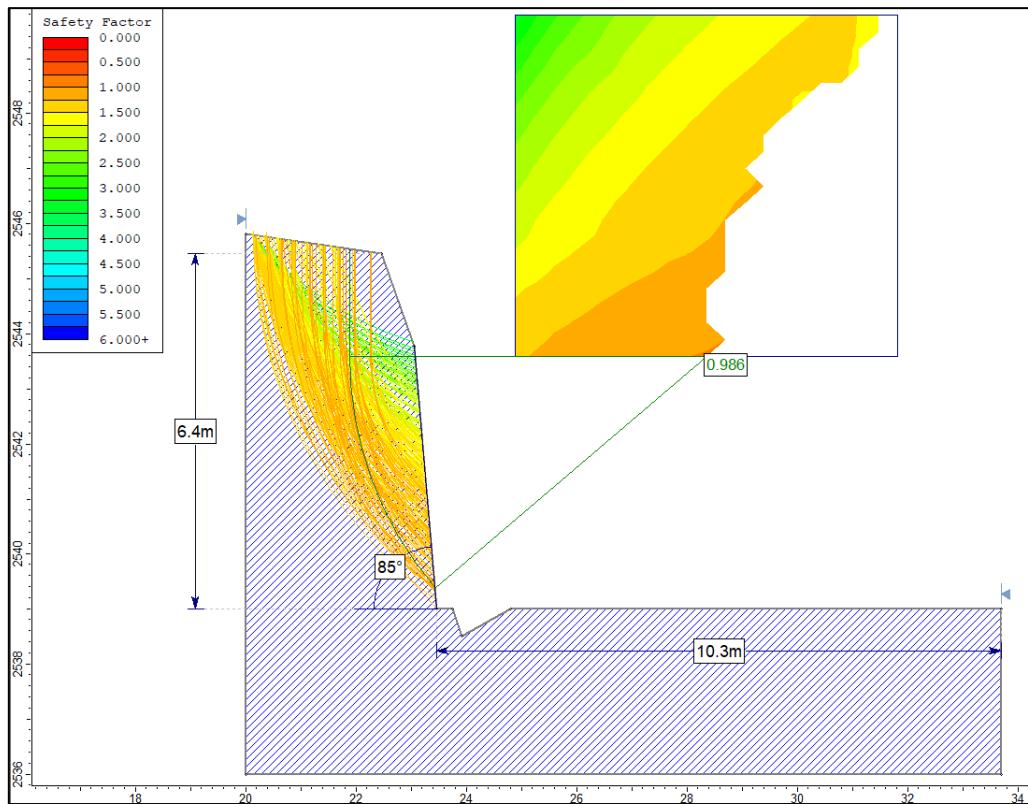


Figura 63: Factor de seguridad SM-05 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales

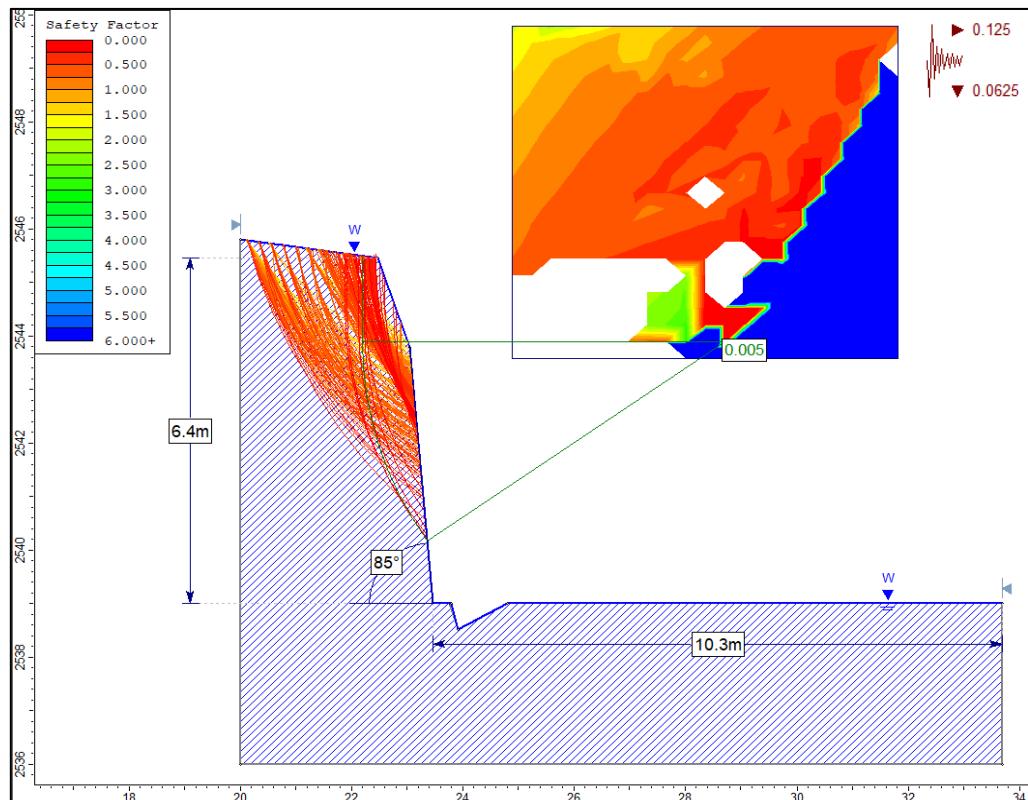


Figura 64: Factor de seguridad SM-05 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

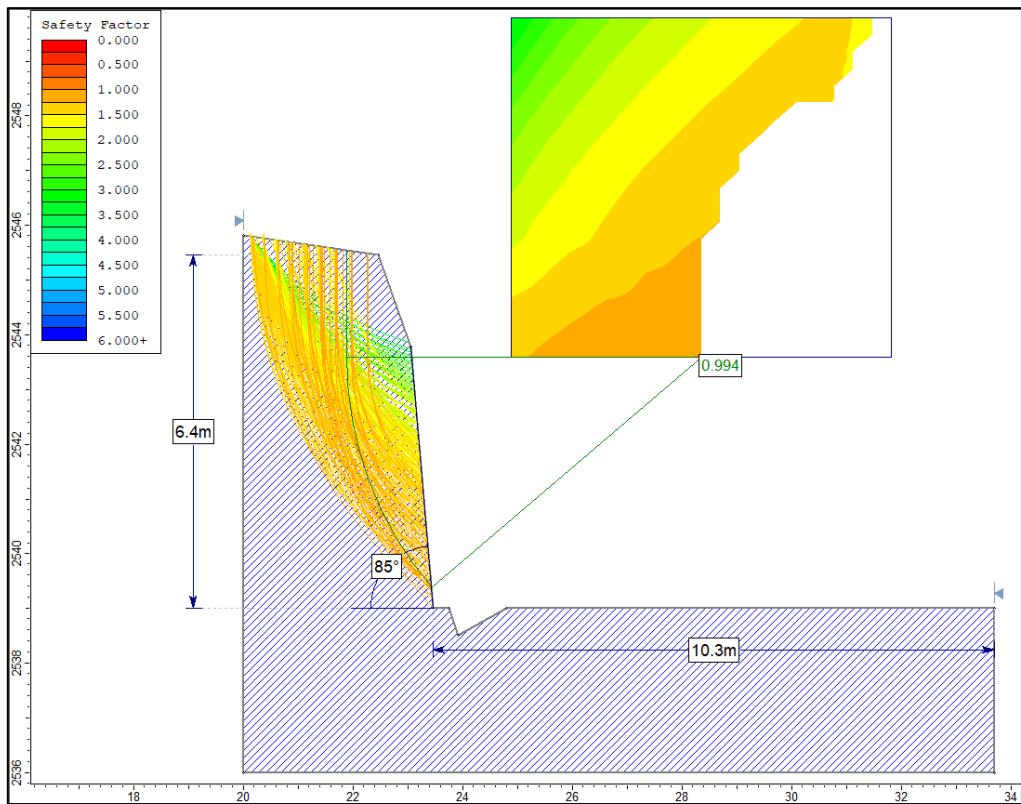


Figura 65: Factor de seguridad SM-05 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales

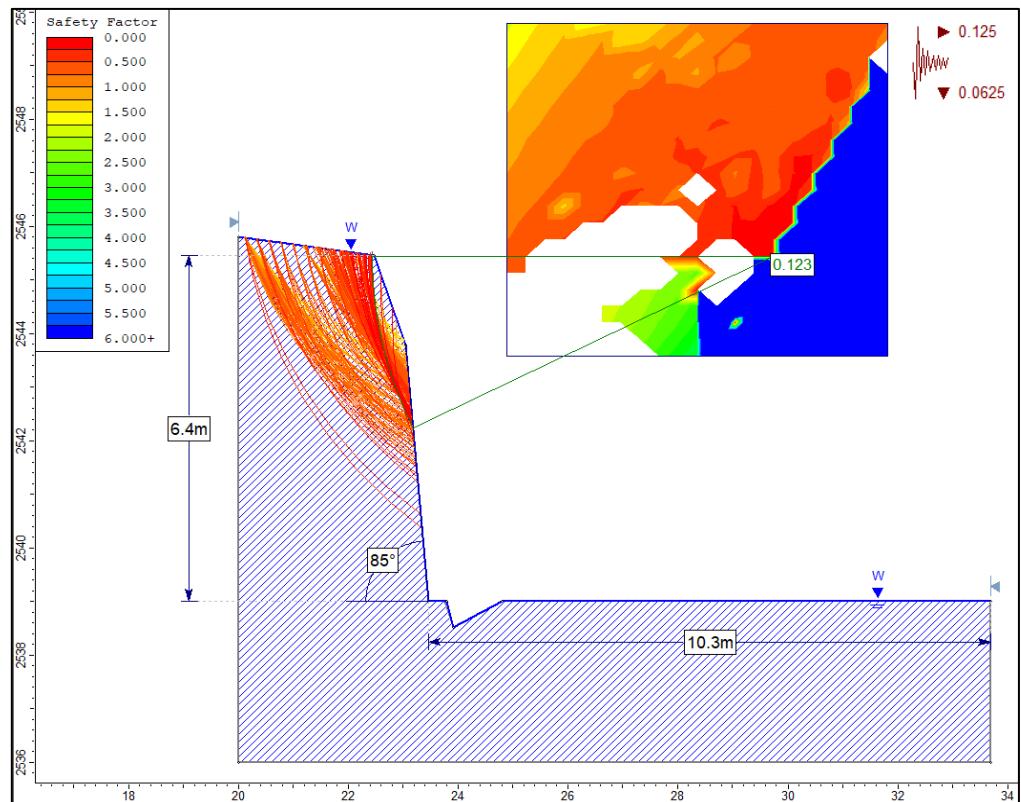


Figura 66: Factor de seguridad SM-05 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

3.8.6. Estación Geotécnica SM – 06

Se continua con litología de la Formación Carhuaz (Ver Plano 05), donde se caracteriza por la presencia de areniscas amarillentas con una tonalidad clara y con fracturas finas con contenido de óxidos y material arcilloso. El talud presenta una pendiente de 84° y una altura de 7.7m (Ver Foto 14a); conformado por tres familias principales de discontinuidades; moderadamente meteorizados y grado de fracturamiento moderado (Ver Foto 14b).

COORDENADAS			GEOMETRÍA DEL TALUD			
NORTE	ESTE	COTA	ALTURA	PIE	DIP	DD
9189958m	811016m	2415m.s.n.m.	7.7m	11.3m	84°	225°



Foto 14: Geometría del talud SM-06(a). Familias del talud SM-06(b).

Cálculo del RQD

Se realizó mediante la ecuación: $RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$

Donde: $\lambda = ND/L = 9.5$

$ND = 19$ y $L = 2$

Se obtiene $RQD = 75.41$

- $\lambda = \text{Espaciamento Promedio entre Discontinuidades}$
- $ND = \text{Número de discontinuidades}$
- $RQD = \text{Designación de Calidad de Roca}$

Cálculo del RMR89

Se calculó el RMR89 obteniendo como resultado el valor de **68** dando una clasificación geomecánica Tipo II - Calidad Buena (ver Tabla 23).

Tabla 22: Asignación de valores para el macizo rocoso, Estación SM- 06.

SISTEMA DE VALORACIÓN DE LA MASA ROCOSA - RMR (SEGÚN BIENIAWSKI, 1989)								VALOR		
A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES			Rango de Valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Indice de carga puntual	> 10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este rango bajo es preferible el ensayo de compresión uniaxial	7		
		Resistencia Compresiva Uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5 – 25 Mpa 1- Mpa < 1 Mpa			
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0		
2	Calidad testigo de perforación RQD	90% - 100%	75%-90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		17		
	Valoración	20	17	13	8	3				
3	Espaciamiento de discontinuidades	> 2m	0.6-2 m	0.2 – 0.6 m	60-200 mm	< 60 mm		15		
	Valoración	20	15	10	8	5				
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas No continuas Cerradas sin apertura Paredes rocosas sanas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes ligeramente intemperizadas	Superficies ligeramente rugosas Apertura < 1mm Paredes altamente intemperizadas	Espejo de falla o panizo <5mm de espesor o apertura de 1-5mm Juntas continuas	Panizo suave >5mm de espesor o apertura > 5mm Juntas continuas		19		
	Valoración	30	25	20	10	0				
	Agua Subterránea	Flujo por 10m de longitud de túnel (1m)	Ninguno	< 10	10-25	25 – 125	> 125			
5		Presión de agua/o principal máximo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5	10		
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
		Valoración	15	10	7	4	0			
E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES										
Longitud de las discontinuidades-persistencia		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 – 20 m	> 20 m				
Valoración		6	4	2	1	0				
Separación (apertura)		Cerrada	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm				
Valoración		6	5	4	1	0				
Rugosidad		Muy rugoso	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla				
Valoración		6	5	3	1	0				
Relleno ()		Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm				
Valoración		6	4	2	1	0				
Intemperización		Sana	Ligera	Moderada	Muy intemperizada	Descompuesta				
Valoración		6	5	3	1	0				
CLASIFICACION	Puntuacion	(81 - 100)	(61 - 80)	(41 - 60)	(21 - 40)	(<20)				
	Clase	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V				
		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala				
VALOR TOTAL RMR		68		TIPO DE ROCA	Buena					

Cálculos en el software RocData

Se hizo uso del software RocData, para obtener las propiedades y parámetros geomecánicos del macizo rocoso, tal como se muestra en la Figura 67.

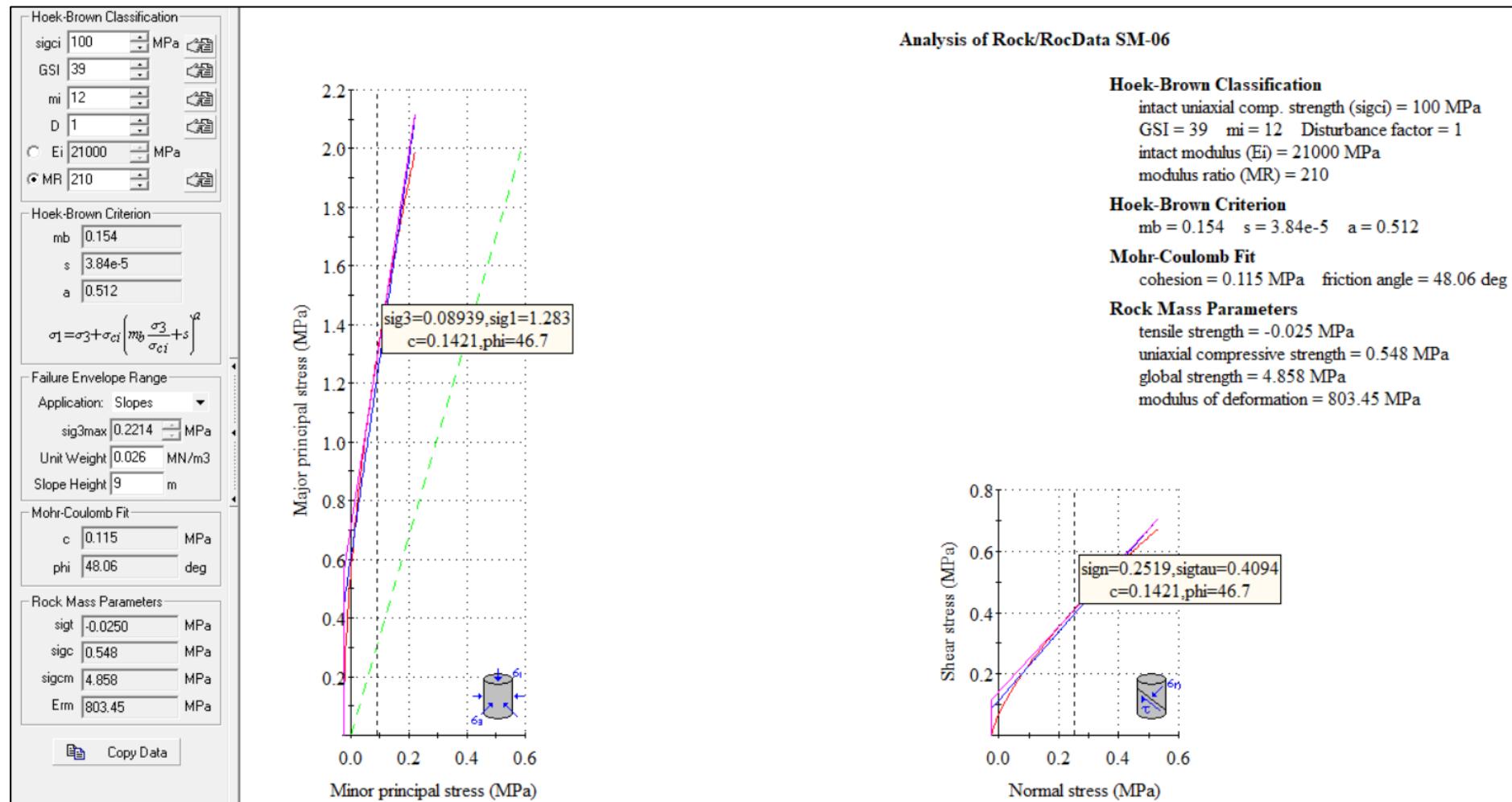


Figura 67: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de la Estación SM-06.

Diseño en el Software Dips v7.0

El análisis cinemático se realizó a través de proyecciones estereográficas de las discontinuidades evidenciadas en campo en la Estación SM-06; definiendo qué: en el diagrama de polos y círculos máximos, contorno de distribución de Fisher; respeto al talud, ángulo de fricción y zona de riesgo de falla; el macizo rocoso muestra probabilidad de 23.81% de rotura planar (Ver figura 68 (a)); 22.97% probabilidad de rotura en cuña. (Ver Figura 68 (b)).

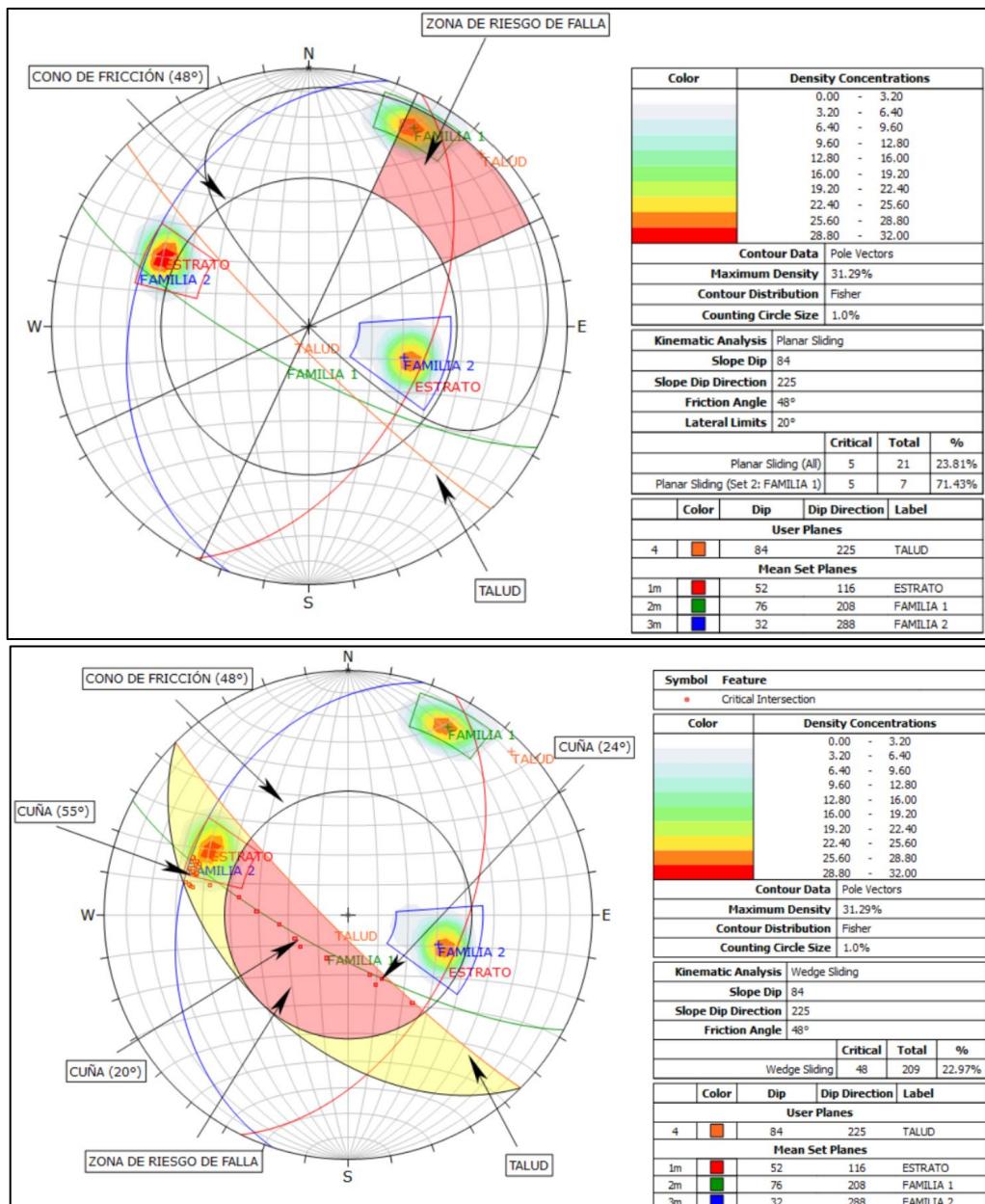


Figura 68: Estación SM-06, Análisis Cinemático de Rotura Planar (a) y Rotura Tipo Cuña (b).

Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0

Los métodos utilizados para poder calcular el factor de seguridad fueron: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado LE/Morgenstern-Price, y Spencer; el número de dovelas fueron 30, tolerancia 0.005 y un máximo de 50 iteraciones y el método de búsqueda de la falla crítica fue de “Grid Search”.

El cálculo del FS se realizó en condiciones normales y condiciones efectivas más sismicidad, considerando la aceleración sísmica máxima de 0.25; coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.125 (Kh) y coeficiente de aceleración máxima vertical de 0.0625 (Kv). El resultado del Análisis se muestra en la Tabla 24, donde se determina que el Talud de la estación SM-06 presenta inestabilidad.

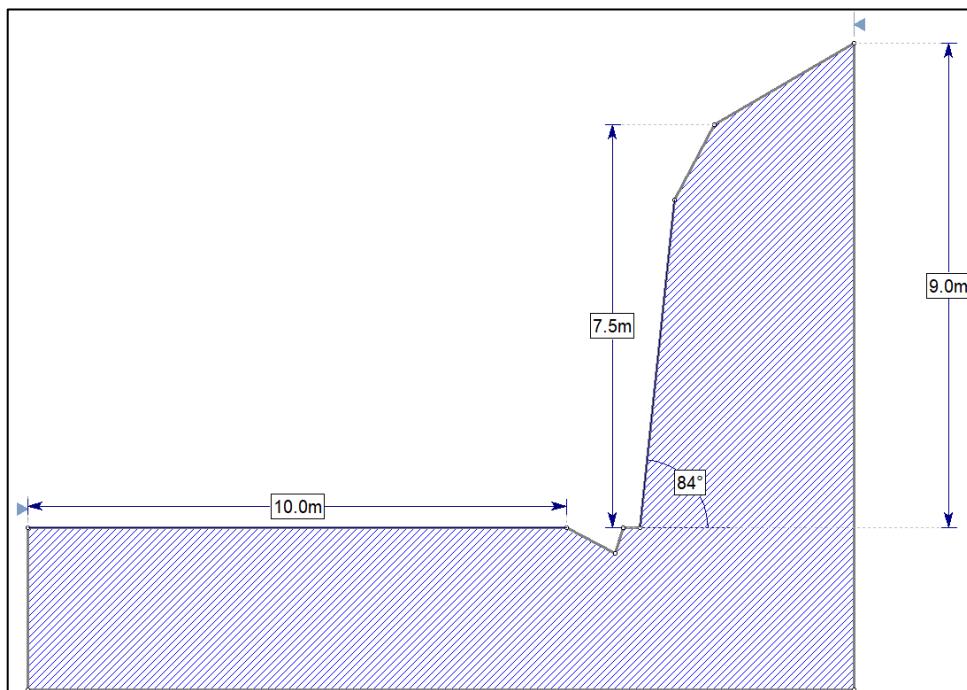


Figura 69: Estación SM-06, dimensiones del Talud.

Tabla 23: Resultado de los cálculos del FS, Estación SM-06.

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	1.057	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.069	Inestable
Janbu simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	1.104	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.010	Inestable
Spencer	Condiciones de Tensiones Totales	1.105	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.148	Inestable
Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	1.112	Inestable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	0.148	Inestable

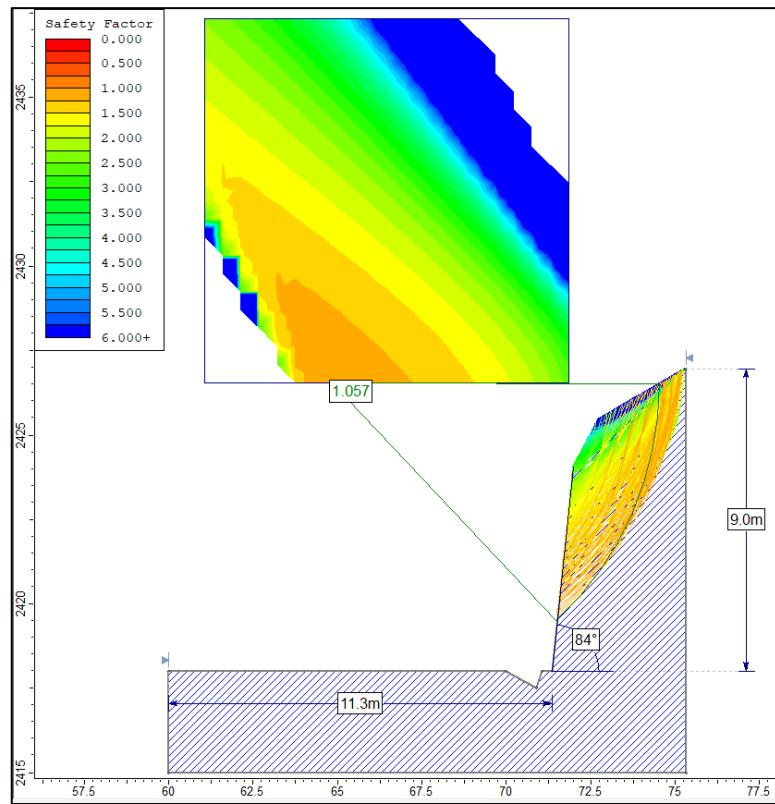


Figura 70: Factor de seguridad SM-06 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

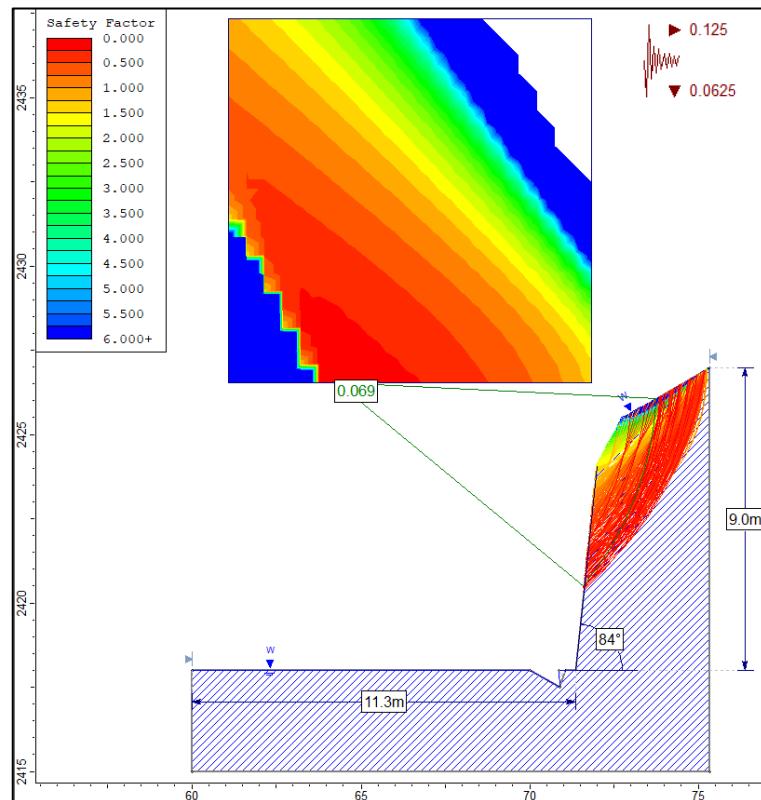


Figura 71: Factor de seguridad SM-06 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

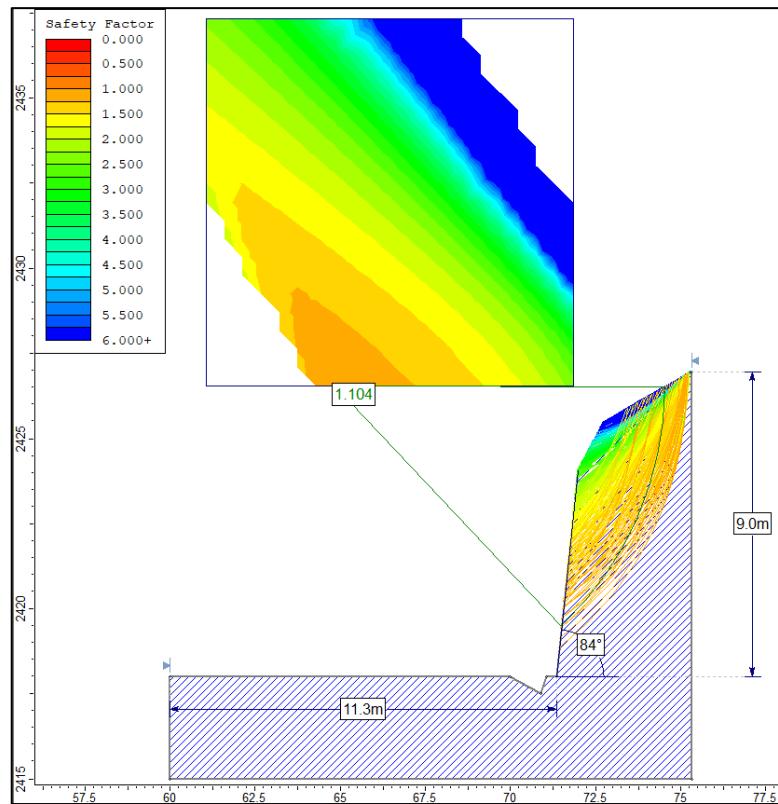


Figura 72: Factor de seguridad SM-06 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

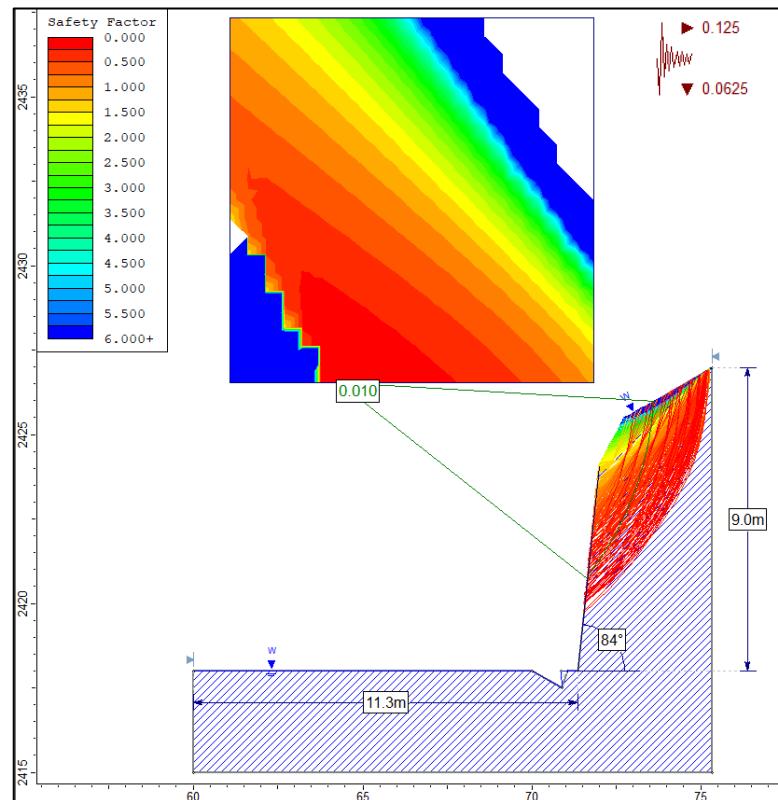


Figura 73: Factor de seguridad SM-06 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

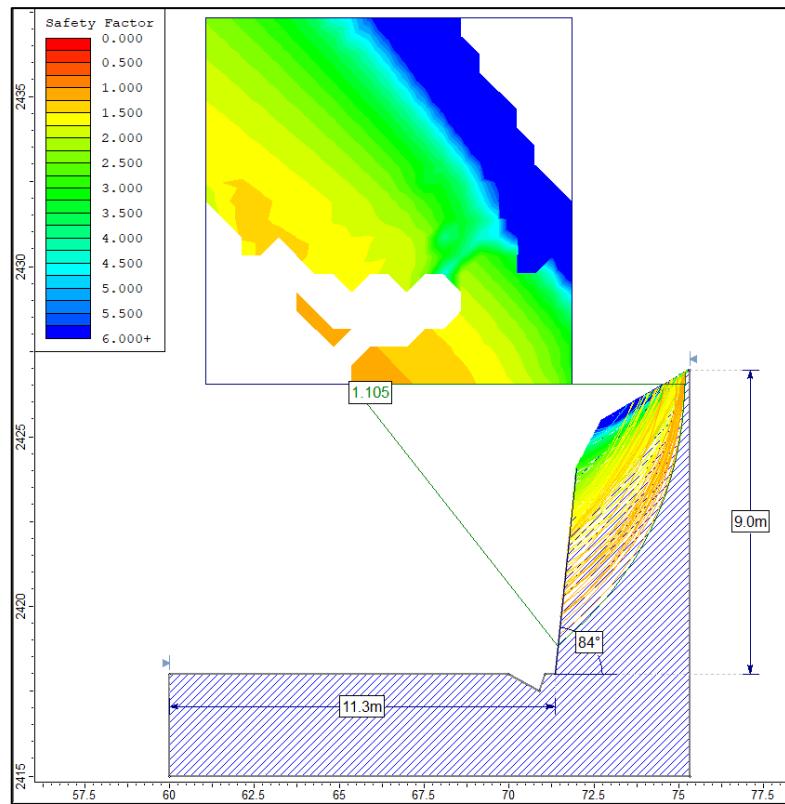


Figura 74: Factor de seguridad SM-06 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales

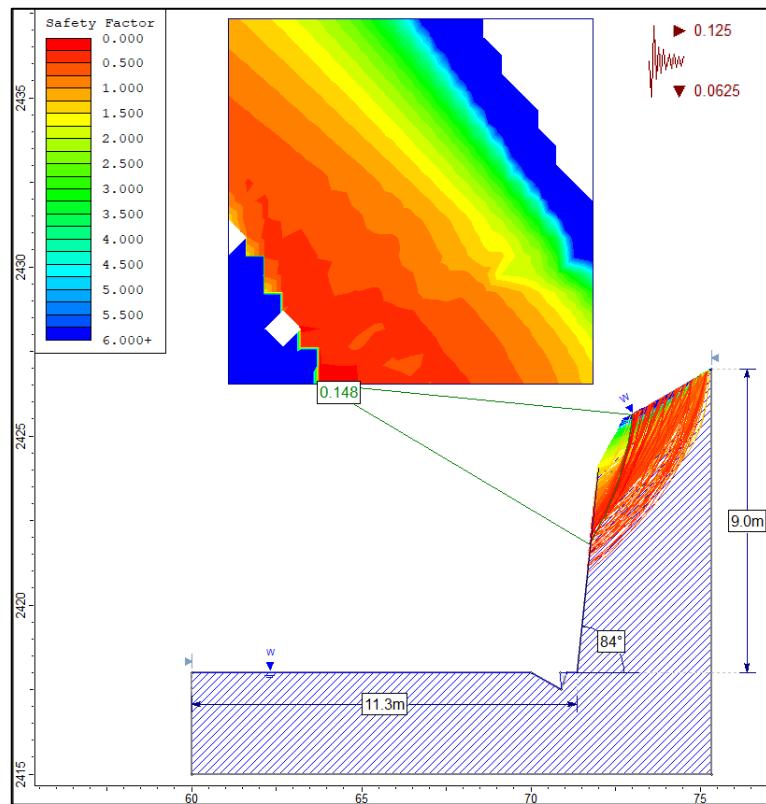


Figura 75: Factor de seguridad SM-06 por método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismidad

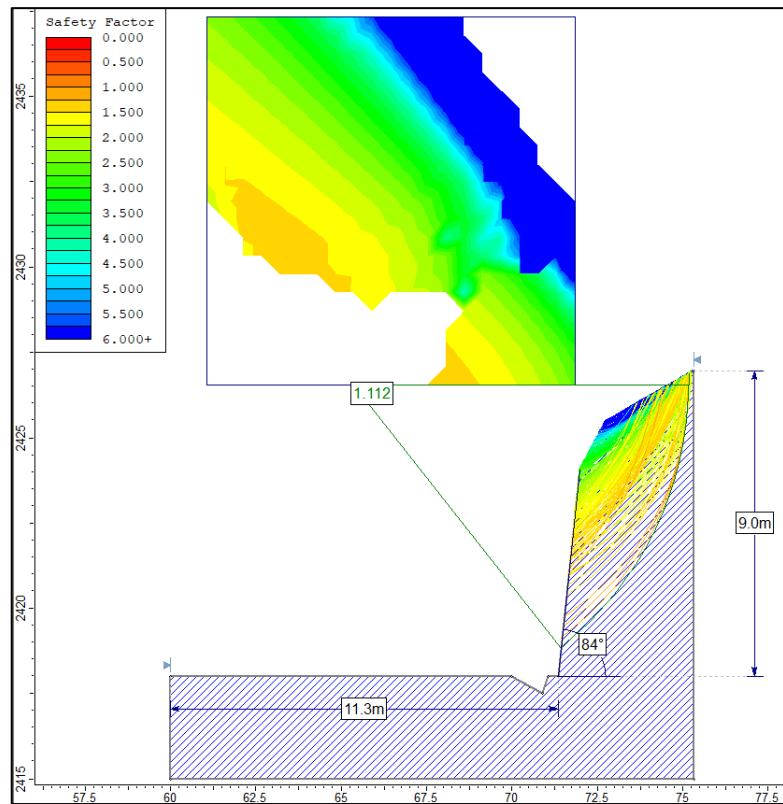


Figura 76: Factor de seguridad SM-06 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales

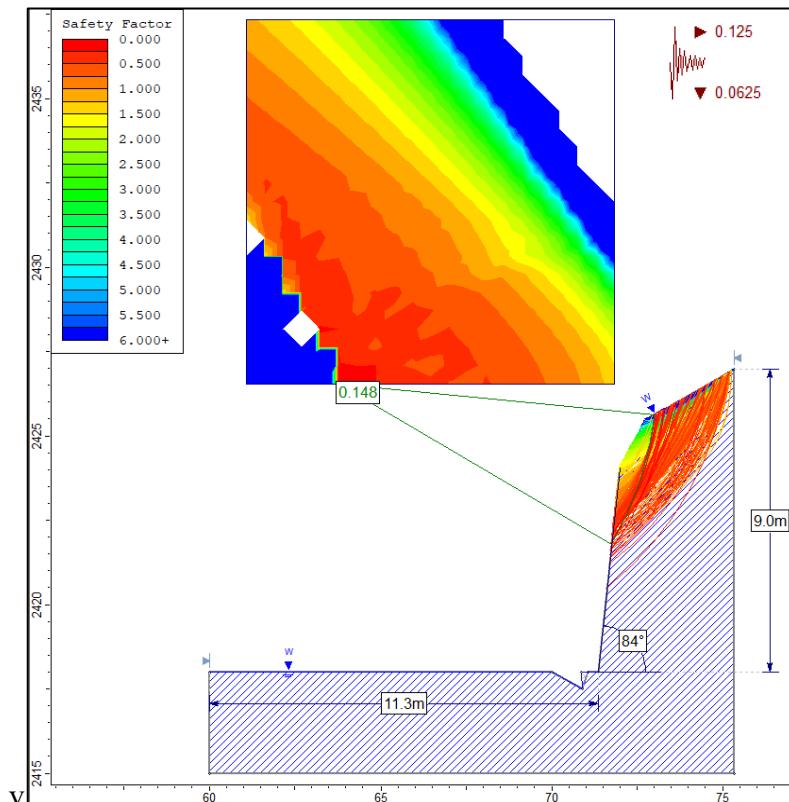


Figura 77: Factor de seguridad SM-06 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La carretera Cajamarca – San Marcos km 1212+600 – km 1223+400, evidencia macizos rocosos de las formaciones litológicas. El corte originó taludes describiendo pendientes muy pronunciadas, por lo que en su gran mayoría presentan una estabilidad bajar y están expuestos a posibles deslizamientos y desprendimiento de rocas planar y en cuña, especialmente durante la época de mayor precipitación que abarca los meses de octubre a marzo; por lo que, la baja estabilidad se presenta de manera persistente en el área de investigación.

Los resultados evidencian que la inestabilidad geotécnica en esta zona, condicionada por la litología sedimentaria de las Formaciones Farrat (Ki-f), Carhuaz (Ki-ca), Santa (Ki-sa) y Chimú (Ki-chi) pertenecientes al Grupo Goyllarisquizga, así como por su estructura interna, diaclasamiento, orientación, espaciado y morfología abrupta con pendientes entre 70° y 86° y alturas de hasta 10 m. Esta situación se agrava con la presencia de meteorización moderada y eventos de precipitación estacional, los cuales reducen la resistencia de los materiales.

Los análisis realizados en seis estaciones geotécnicas seleccionadas por su condición crítica validan que la combinación de geometría desfavorable, litología fracturada y el agua que actúa como detonante para fallas planas, en cuña.

Para clasificación y análisis geomecánico de los macizos rocoso en cada estación, se usaron los parámetros: RMR89, RQD y GSI. De acuerdo al RMR89 se obtuvieron los siguientes resultados rocas de calidad: Tipo III y II , en el rango de 58 – 70; principalmente debido a factores condicionantes tanto internos como externos, y variables del ambiente, como la litología, que varían en granulometría y composición de grano medio a fino, como de presentar pequeños vestigios de cuarzo y óxidos, meteorización moderada, grado de fracturamiento de medio a alto.

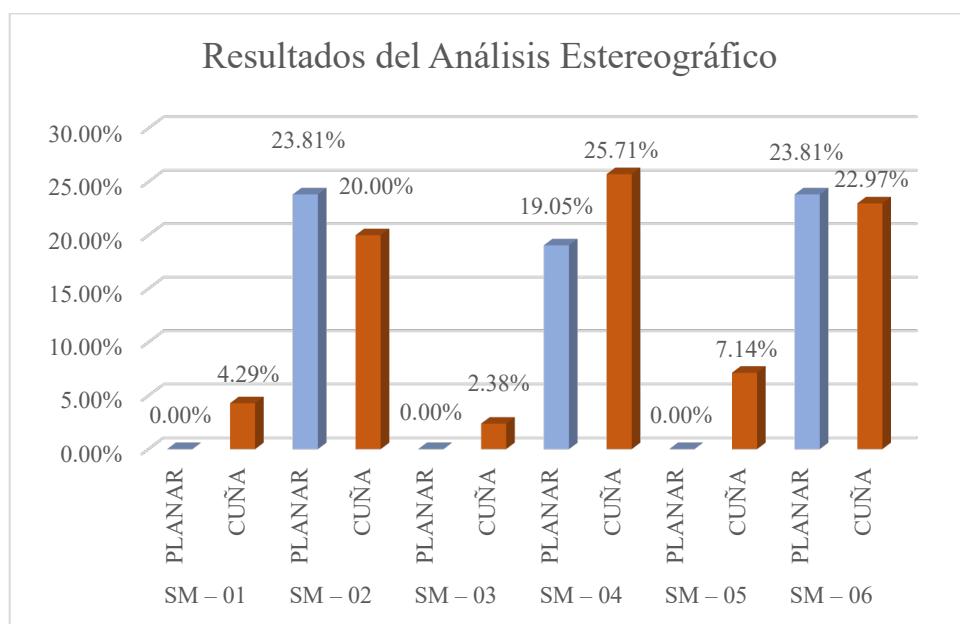
4.1. ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO – CINEMÁTICO

El análisis cinemático se realizó en el software Dips v7.0, el cual permitió evaluar la disposición espacial de las discontinuidades respecto al plano de los taludes. Se identificaron principalmente dos tipos de mecanismos de falla, rotura planar, con probabilidades de ocurrencia entre 14.29% y 23.81% y rotura en cuña, con probabilidades entre 17.14% y 25.71%. (Ver tabla 25)

Tabla 24: Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes.

TALUD CRÍTICO	TIPO DE ROTURA	PORCENTAJE (%)	INTERPRETACIÓN
SM – 01	PLANAR	0.00%	Baja incidencia, de posibles roturas
	CUÑA	4.29%	
SM – 02	PLANAR	23.81%	Alta susceptibilidad tanto planar como en cuña.
	CUÑA	20.00%	
SM – 03	PLANAR	0.00%	Muy baja incidencia, casi estable.
	CUÑA	2.38%	
SM – 04	PLANAR	19.05%	Zona crítica: máxima ocurrencia de cuñas y alto planar.
	CUÑA	25.71%	
SM – 05	PLANAR	0.00%	Zona crítica: máxima ocurrencia de cuñas y alto planar.
	CUÑA	7.14%	
SM – 06	PLANAR	23.81%	Alta criticidad, riesgos combinados de planar y cuña.
	CUÑA	22.97%	
Promedio de Rotura Planar		11.1%	
Promedio de Rotura en Cuña		13.7%	

Figura 78: Resultados del Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes



Las estaciones SM-01, SM-02 y SM-04 destacan por presentar las mayores probabilidades de rotura, con presencia de diaclasas persistentemente orientadas en sentido paralelo o subparalelo a los frentes de talud. Estas discontinuidades, junto con el alto grado de fracturamiento ($ND > 25$) y espaciamientos medios $\lambda < 0.40$ m, generan una configuración estructural altamente inestable.

Este comportamiento coincide con lo propuesto por González de Vallejo et al. (2002), quienes describen que los macizos rocosos sedimentarios presentan un alto potencial de rotura cuando las diaclasas se encuentran abiertas, llenas y orientadas desfavorablemente.

En este sentido, se reafirma que la orientación y condiciones de las discontinuidades son los principales factores condicionantes de la inestabilidad, superando incluso a la calidad litológica general del macizo.

En cada estación del área de investigación se realizó el análisis cinemático a través de proyecciones estereográficas con el software Dips v7.0, con el objetivo de poder determinar las zonas de falla de cada uno de los taludes, en función de las discontinuidades y el ángulo de fricción interno de la roca en relación al D y DD del talud. Se analizó puntualmente para los casos de rotura planar y rotura tipo cuña, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 25, donde se demuestra si hay riesgo por falla planar y falla en cuña en cada una de las 6 estaciones.

4.2. FACTOR DE SEGURIDAD - SOFTWARE SLIDE V.6.0

Para evaluar la estabilidad global de los taludes, se utilizó el software Slide v6.0, mediante los métodos de equilibrio límite: Bishop Simplificado, Janbu, Spencer y Gle/Morgenstern-Price, aplicados bajo dos escenarios, condiciones normales (tensiones totales) y condiciones críticas (tensiones efectivas combinadas con sismicidad).

Para el análisis de resultados, se utiliza los rangos de Factores de Seguridad recomendados por Hoek 2007, mostrados en la siguiente Tabla.

Tabla 25: Rangos de Factores de Seguridad, recomendados por Hoek, 2007.

FACTOR DE SEGURIDAD	
Inestable	<1.0
Estable relative	1.0 – 1.3
Estable a corto plazo	1.3 – 1.5
Estable a largo plazo	>1.5

Fuente: Hoek, E. 2007.

Los resultados de cada talud con probabilidad de deslizamiento fueron obtenidos por el método de equilibrio límite de dos dimensiones con ayuda del software Slide v6.0, obteniéndose los siguientes resultados:

- El Talud (SM – 01) presenta condición inestable porque sus Factores de Seguridad están entre 0.001 – 1.179; tanto en condiciones de Tensiones Totales, como en condiciones de Tensiones Efectivas.
- El Talud (SM – 02) presenta condición inestable porque sus Factores de Seguridad están entre 0.005 – 1.003; tanto en condiciones de Tensiones Totales, como en condiciones de Tensiones Efectivas.
- El Talud (SM – 03) presenta condición inestable porque sus Factores de Seguridad están entre 0.005 – 1.002; tanto en condiciones de Tensiones Totales, como en condiciones de Tensiones Efectivas.
- El Talud (SM – 04) presenta condición inestable porque sus Factores de Seguridad están entre 0.023 – 0.820; tanto en condiciones de Tensiones Totales, como en condiciones de Tensiones Efectivas.
- El Talud (SM – 05) presenta condición inestable porque sus Factores de Seguridad están entre 0.001 – 0.094; tanto en condiciones de Tensiones Totales, como en condiciones de Tensiones Efectivas.
- El Talud (SM – 06) presenta condición inestable porque sus Factores de Seguridad están entre 0.010 – 1.148; tanto en condiciones de Tensiones Totales, como en condiciones de Tensiones Efectivas.

Estos valores reflejan un comportamiento mecánico altamente comprometido, influenciado por variables como, pendientes superiores a 75°, macizos con GSI entre 45 y 62, presencia de agua y relleno en discontinuidades y cohesiones bajas (<0.30 MPa) y ángulos de fricción inferiores a 35°.

Estos resultados son coherentes con los planteamientos de Hoek & Brown (2002), quienes advierten que en macizos fracturados y con saturación parcial, los modelos no lineales de resistencia son más representativos, y que las cargas sísmicas agravan significativamente la pérdida de estabilidad. Asimismo, autores como Camargo (2017) e Iberico (2015) reportaron condiciones similares en taludes de carreteras, donde la suma de geometría desfavorable y litología meteorizada resultó en factores de seguridad críticos.

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante la presente investigación se descubrió que la inestabilidad de taludes en el tramo Km.1212 + 600 – Km.1223 + 400 de la carretera Cajamarca – San Marcos, es producto de la interacción de las litomorfoestructuras en las Formaciones Carhuaz y Chimú, las cuales evidencian moderado fracturamiento y que, según el RMR₈₉, las rocas se encuentran entre los Tipos III y II; los factores geométricos como ángulo del talud, parámetros geomecánicos los que están afectados por fuertes precipitaciones e infiltración de aguas pluviales y la sismicidad de la zona; los que generan deslizamientos planares y cuñas. Por todo lo indicado demostramos que nuestra hipótesis ha sido contrastada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se determinó que los taludes del tramo Km 1212+600 – Km 1223+400 de la carretera Cajamarca – San Marcos presentan condiciones de inestabilidad geotécnica severa, principalmente asociadas a la presencia de discontinuidades desfavorables, alto grado de fracturamiento y saturación por lluvias, lo que representa un riesgo persistente para la vía.

El levantamiento de campo permitió identificar que los taludes se desarrollan en macizos rocosos de las formaciones Farrat, Carhuaz, Santa y Chimú, caracterizados por estructuras como pliegues, fallas y diaclasas, que controlan los modos de falla observados (planas y en cuña).

Los taludes presentan fracturamiento medio a alto (17–32 discontinuidades, RQD de 43% a 61%), clasificando como macizos de calidad regular a buena según RMR (58–70) y GSI (45–62). Estos valores evidencian sectores con debilidad estructural significativa, donde predominan las roturas planas y en cuña.

Los análisis en Slide v6.0 mostraron que los factores de seguridad varían entre 0.796 y 1.180 en tensiones efectivas, reflejando estabilidad limitada. Bajo tensiones efectivas más sismicidad, los valores descienden a 0.001 – 0.352, confirmando inestabilidad crítica en la totalidad de los taludes.

Se identificaron como zonas críticas de mayor riesgo las estaciones SM-01, SM-02 y SM-04, donde se concentran los factores de seguridad más bajos y condiciones estructurales más desfavorables, lo cual justifica la necesidad de medidas inmediatas de estabilización, drenaje y monitoreo.

5.2. RECOMENDACIONES

Realizar ensayos triaxiales y corte directo en muestras representativas de los macizos rocosos de las estaciones evaluadas. Para así obtener parámetros geomecánicos más precisos y, en consecuencia, calcular con mayor confiabilidad los Factores de Seguridad. La acción debe implementarse por parte de la Municipalidad provincial de San Marcos y estar a cargo de un laboratorio geotécnico especializado.

Implementar un programa de monitoreo entre los meses de octubre y marzo, coincidiendo con la temporada de lluvias, cuando el agua actúa como variable detonante de inestabilidad.

Se recomienda realizar inspecciones en campo, para detectar posibles deslizamientos, y roturas planares y en cuña, reduciendo el riesgo de interrupciones de la vía. A través de la Concesionaria Vial Sierra Norte S.A., bajo supervisión del Ministerio de Transportes y Comunicaciones y apoyo de especialistas en geotecnia.

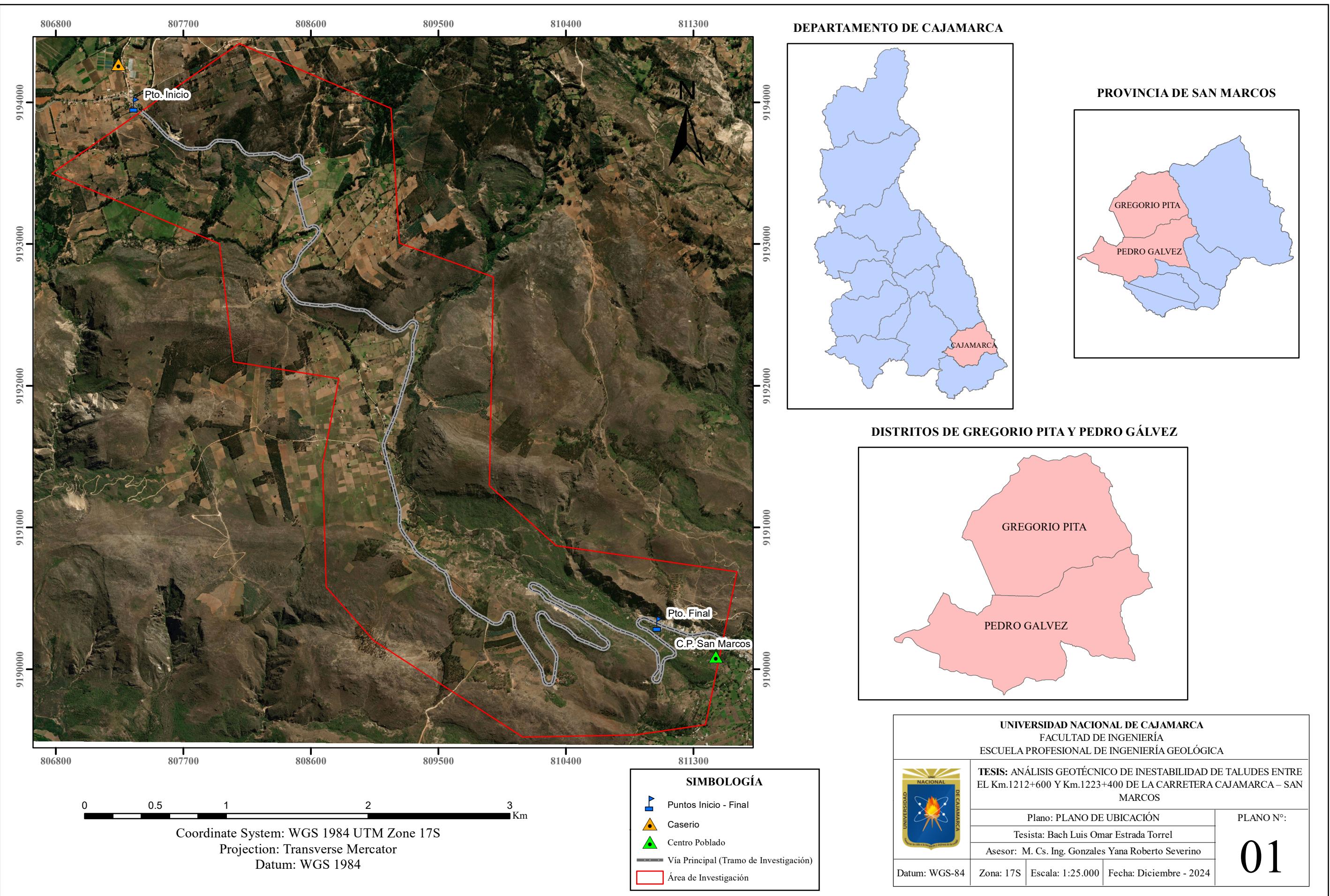
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

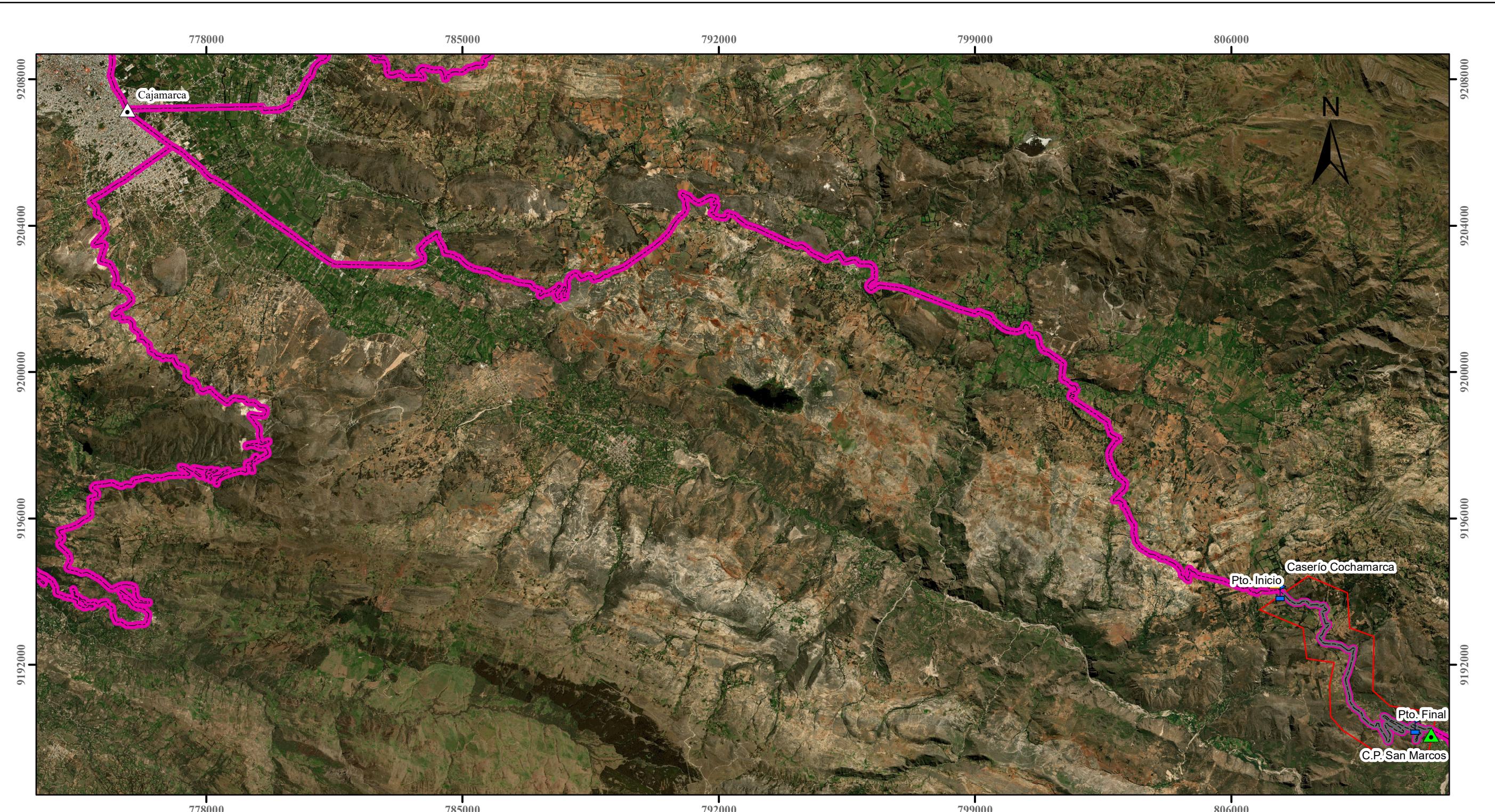
- Avalos JC. 2017. Evaluación geodinámica y modelamiento geotécnico del deslizamiento de Madrigal – Arequipa. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Bieniawski Z. 1989. Engineering rock mass classifications. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Cahill T, Isacks B. 1992. Sismicidad y forma de la placa subductada de Nazca. Nueva York, EE.UU.: Revista de Investigación Geofísica.
- Camargo D. 2017. Estudio geológico-geotécnico de detalle del km 484 y 496 del ONP (Oleoducto Norperuano) para el diseño de obras de estabilización y/o mitigación a nivel de ingeniería básica, provincia de Bagua, departamento de Amazonas. Cusco, Perú: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Díaz L. 2017. Caracterización geomecánica del macizo rocoso presente en el bloque 5 del sinclinal La Jagua, La Jagua de Ibirico, Cesar. Medellín, Colombia: Fundación Universitaria del Área Andina.
- Domínguez J. 2004. Investigación geológica-geotécnica de casos especiales en la carretera Corral Quemado–Pedro Ruiz, departamento de Amazonas. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Gamarra E. 2017. Construcción de dique como estabilización de depósitos de material inerte y botadero de material de préstamo. Lima, Perú: Centro Geotécnico Internacional.
- García R. 2014. Meteorología y climatología: conceptos fundamentales. Madrid, España: Paraninfo.
- Gavilanes H, Andrade B. 2004. Introducción a la ingeniería de túneles. Ecuador: Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador (AIME).
- Goicochea G, Vásquez J. 2021. Estudio geomecánico para el diseño y estabilidad del talud Chulucana de la progresiva 1213+000 al 1213+500 carretera San Marcos, Cajamarca 2020. Cajamarca, Perú: Universidad Privada del Norte.
- Gómez J. 2017. Evaluación geodinámica y modelamiento geotécnico del deslizamiento de Madrigal – Arequipa. Arequipa, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- González L, Ferrer M, Ortúñoz L, Oteo C. 2004. Ingeniería geológica. Madrid, España: Pearson Educación.
- Herrera CC, Padilla RJ, Ávalos JC. 2015. Evaluación geológica y geodinámica del centro poblado Pijobamba. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú.

- Highland L, Bobrowsky P. 2008. The landslide handbook: a guide for prevention and mitigation. Washington D.C., USA: U.S. Geological Survey Circular.
- Hoek E. 1997. Confiabilidad de las estimaciones de Hoek-Brown de las propiedades del macizo rocoso y su impacto en el diseño. Chuquicamata, Chile: Taller Geotécnico Interdivisional, Codelco.
- Hoek E. 2002. El criterio de rotura de Hoek-Brown. Toronto, Canadá: RocScience Inc.
- Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. 2002. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Toronto, Canadá: Proceedings of the North American Rock Mechanics Society (NARMS).
- Hurtado M. 2009. Modelo para estabilización de taludes en la carretera Selva Alegre–Saguangala que permita disminuir costos de mantenimiento. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- Ibérico R. 2015. Estabilización y recuperación de taludes en carreteras, caso IIRSA Norte tramo n.^o 1 km 45+690 – km 45+830. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.
- Medina J. 1991. Agentes geodinámicos. En: Medina J, ed. Fenómenos geodinámicos: estudio y medidas de tratamiento. Lima, Perú: Soluciones Prácticas (ITDG). p. 85.
- Montoya F. 2014. Evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca–El Gavilán. Cajamarca, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- PREVAED. 2024. Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres. Lima, Perú.
- Puell F. 2004. La linealización del criterio de Hoek-Brown en el análisis de la estabilidad general de taludes en roca. Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil 7.
- Ramírez G. 2015. Planeación estratégica para la estabilidad de taludes en cortes de carreteras, fundamentada en el análisis de riesgos. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Rodríguez R. 2016. Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo–Corisorgona. Cajamarca, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- SENAMHI. 2017. Datos climatológicos. Cajamarca, Perú.
- Suarez J. 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia: Publicaciones UIS.
- Suarez J. 2009. Deslizamientos: análisis geotécnico. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

ANEXO 01

PLANOS



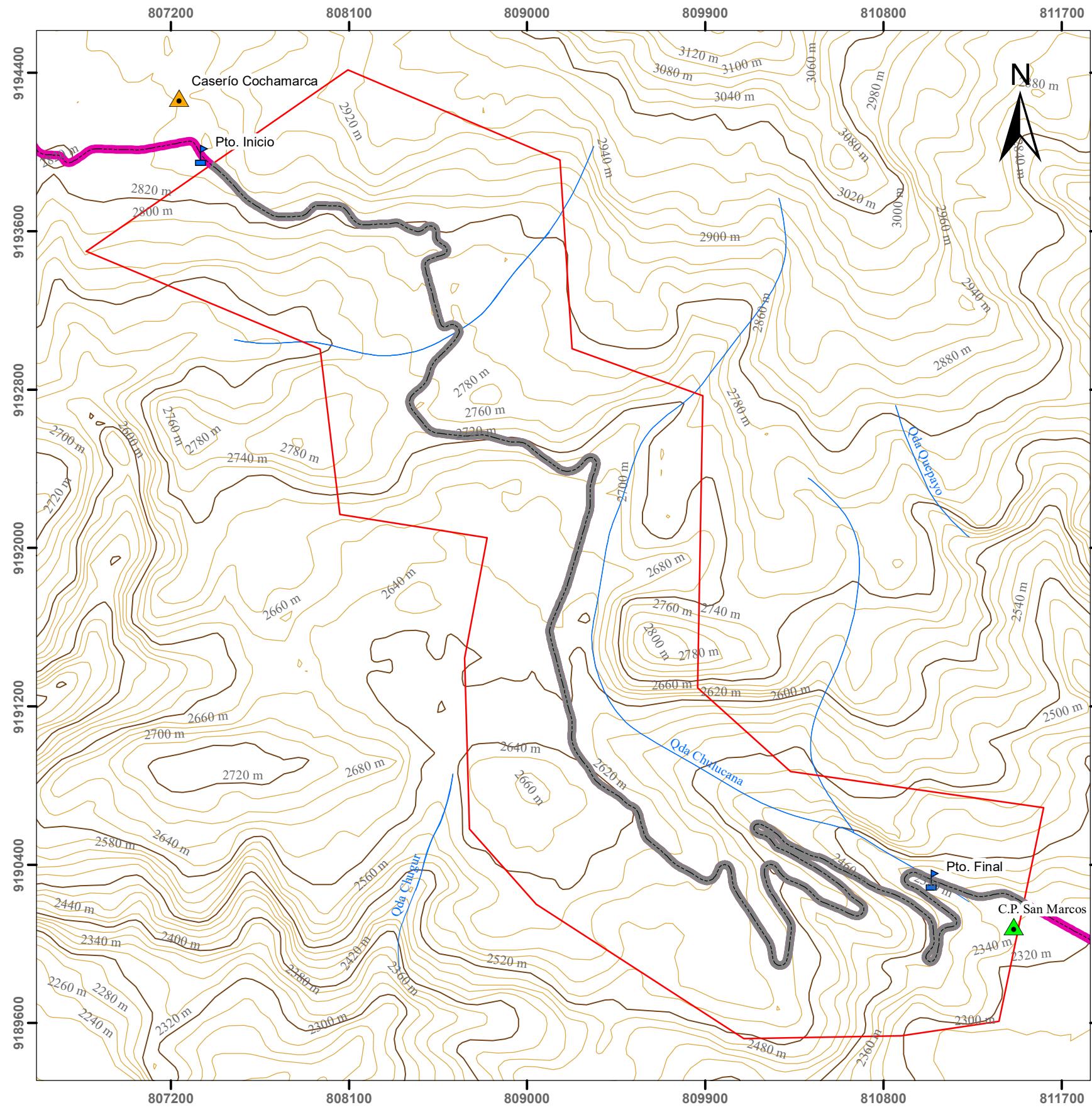


0 1.5 3 6 9 Km

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

SIMBOLOGÍA	
	Puntos Inicio - Final
	Caserío
	Centro Poblado
	Ciudad
	Vía Principal (Tramo de Investigación)
	Carretera Asfaltada
	Área de Investigación

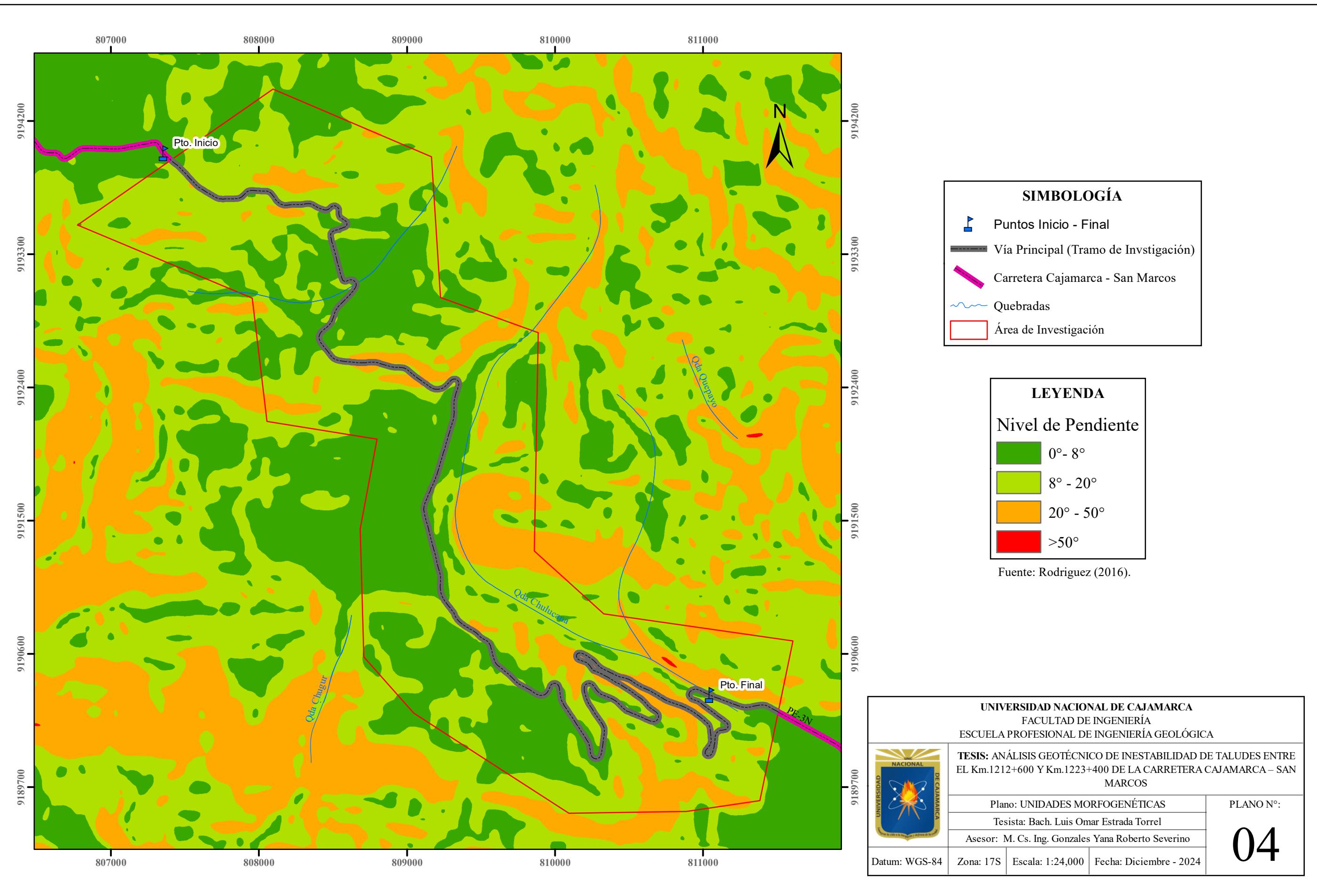
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	TESIS: ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE INESTABILIDAD DE TALUDES ENTRE EL Km.1212+600 Y Km.1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA – SAN MARCOS
Plano: PLANO DE ACCESIBILIDAD	PLANO N°:
Tesista: Bach Luis Omar Estrada Torrel	02
Asesor: M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino	
Datum: WGS-84	Zona: 17S Escala: 1:110,000 Fecha: Diciembre - 2024

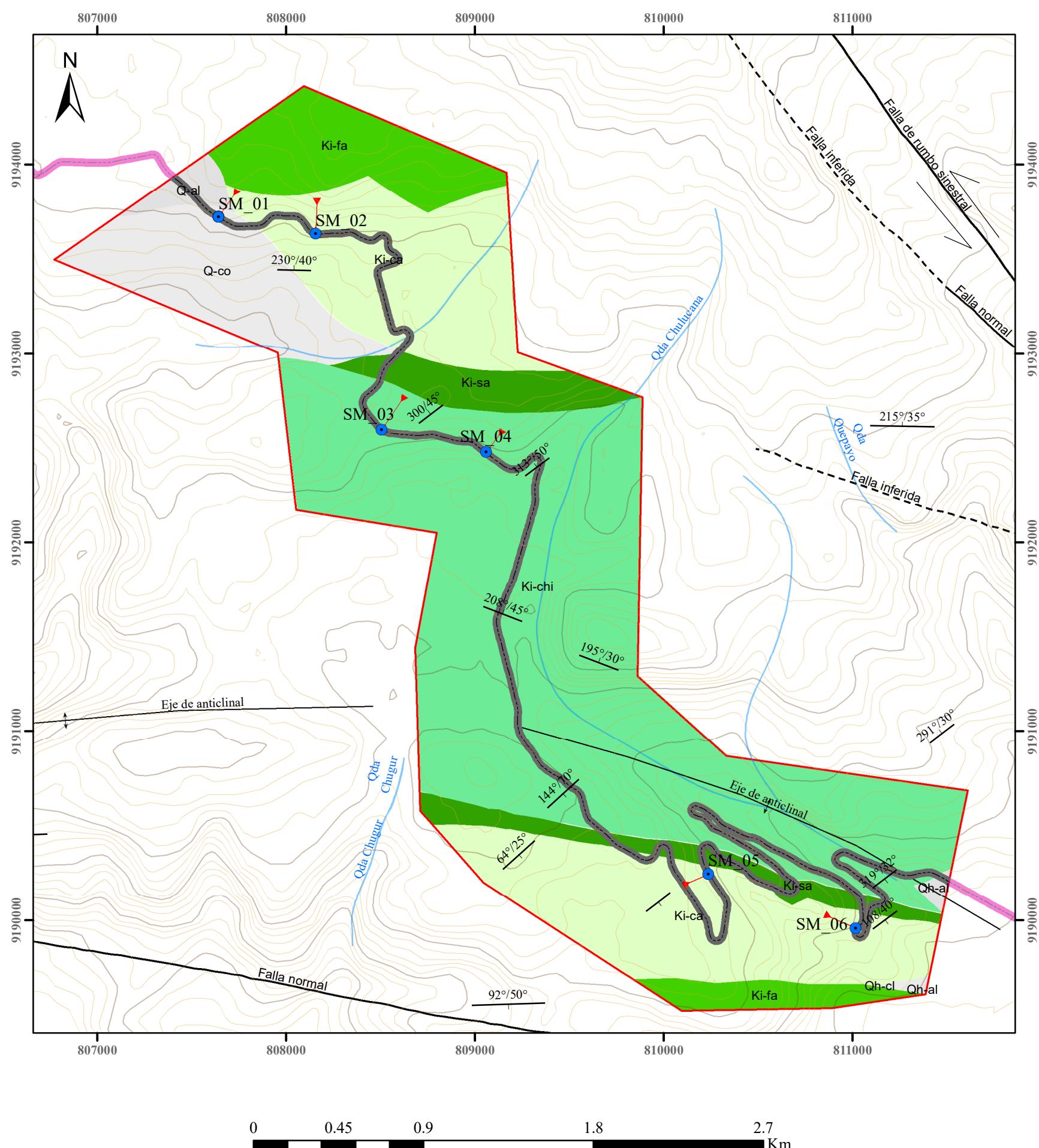


SIMBOLOGÍA	
Puntos Inicio - Final	
Caserío	
Centro Poblado	
Vía Principal (Tramo de Investigación)	
Carretera Cajamarca - San Marcos	
Área de Investigación	
Quebradas	
Curvas de nivel Mayores	
Curvas de nivel Menores	

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	TESIS: ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE INESTABILIDAD DE TALUDES ENTRE EL Km.1212+600 Y Km.1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA – SAN MARCOS
Plano: MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)	PLANO N°:
Tesista: Bach. Luis Omar Estrada Torrel	03
Asesor: M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino	
Datum: WGS-84	Zona: 17S Escala: 1:24,000 Fecha: Diciembre - 2024

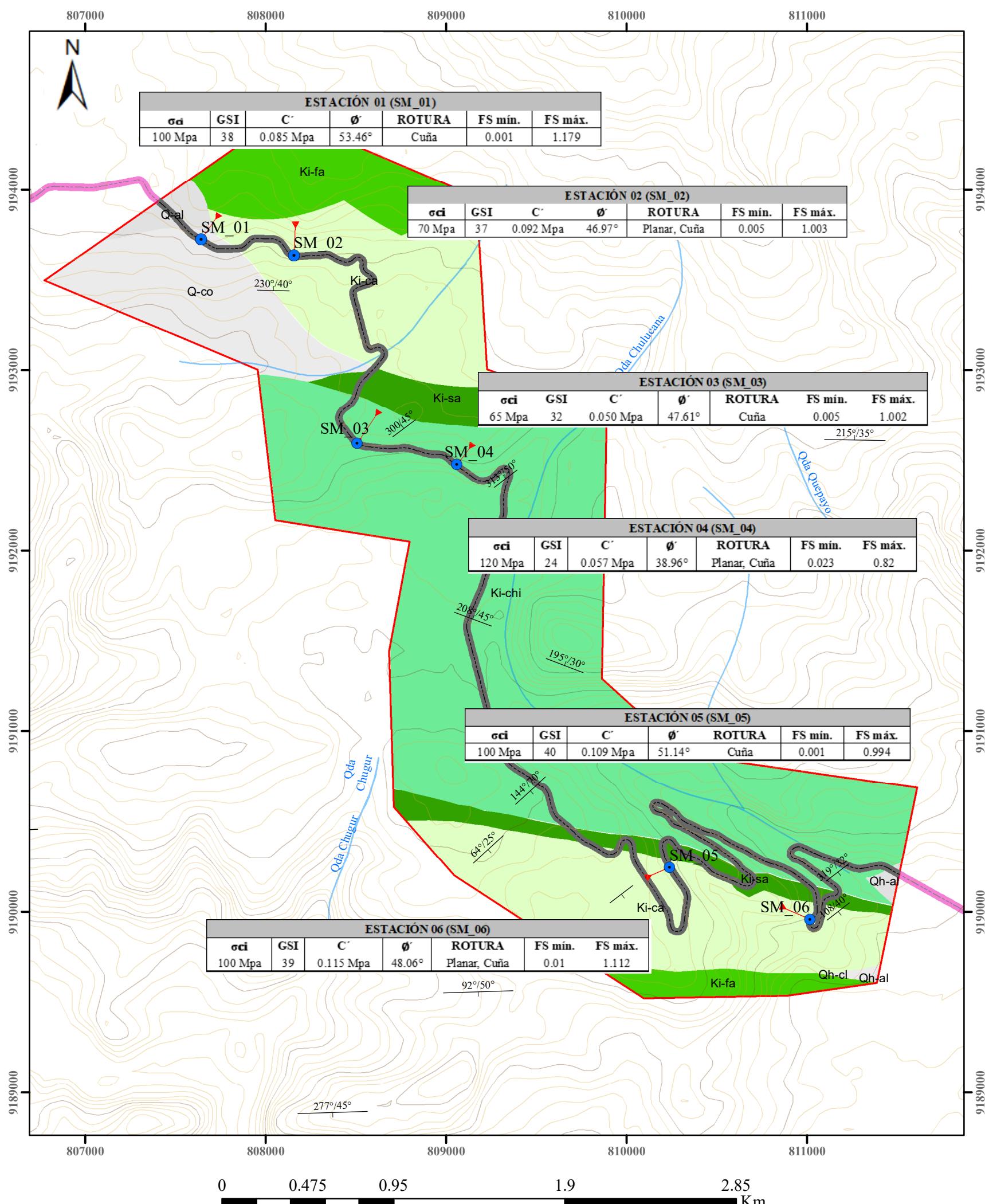




LEYENDA	
UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	
Q - co	Depósito Coluvial
Q - al	Depósito Aluvial
Ki - fa	Formación Farrat
Ki - ca	Formación Carhuaz
Ki - sa	Formación Santa
Ki - chi	Formación Chimú

SIMBOLOGÍA	
●	Estaciones
→	Corte Taludes
—	Vía Principal (Tramo de Investigación)
—	Carretera Cajamarca - San Marcos
—	Curvas de nivel Mayores
—	Curvas de nivel Menores
—	Az/Dip
↔	Eje de anticlinal
—	Falla de rumbo sinestral
- - -	Falla inferida
—	Falla normal
■	Área de Investigación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	TESIS: ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE INESTABILIDAD DE TALUDES ENTRE EL Km.1212+600 Y Km.1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA – SAN MARCOS
Plano: GEOLÓGICO - ESTRUCTURAL	PLANO N°: 05
Tesista: Bach. Luis Omar Estrada Torrel	
Asesor: M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino	
Datum: WGS-84	Zona: 17S Escala: 1:24,000 Fecha: Diciembre - 2024



LEYENDA	
UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	
Q - co	Depósito Coluvial
Q - al	Depósito Aluvial
Ki - fa	Formación Farrat
Ki - ca	Formación Carhuaz
Ki - sa	Formación Santa
Ki - chi	Formación Chimú

SIMOBIOLOGÍA	
● Estaciones Críticas	
● Estaciones	
— Az/Dip	
— Curvas de nivel Mayores	
— Curvas de nivel Menores	
→ Corte Taludes	
— Vía Principal (Tramo de Investigación)	
— Carretera Cajamarca - San Marcos	
— Área de Investigación	

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	TESIS: ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE INESTABILIDAD DE TALUDES ENTRE EL Km.1212+600 Y Km.1223+400 DE LA CARRETERA CAJAMARCA – SAN MARCOS
Plano: GEOTÉCNICO	PLANO N°:
Tesista: Bach. Luis Omar Estrada Torrel	06
Asesor: M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino	
Datum: WGS-84	Zona: 17S Escala: 1:24,000 Fecha: Diciembre - 2024