

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**TESIS PROFESIONAL**

**DETERMINACIÓN DE LA INESTABILIDAD DE TALUDES EN LAS ZONAS  
CRÍTICAS EN LA CARRETERA CELENDÍN – BALSAS**

**Para Optar El Título Profesional de:  
INGENIERO GEÓLOGO**

**Presentado por:**

**BACH. ANNA VICTORIA RIVASPLATA ÑAZCO**

**Asesor:**

**DR. ING. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

Esta Tesis la dedico a mi Dios todopoderoso, por ser mi fuente y mi mano derecha, por guiarme por el buen camino y permitir que este sueño se hiciera realidad.

A mis padres, Everth y Aurora, regalo maravilloso que Dios me ha dado, por su amor, por su apoyo incondicional, por sus esfuerzos y sacrificios que hicieron por mí. Los amo.

A mi hermano Mitchel por su cariño, sus consejos, y su ayuda en los momentos difíciles, para no decaer y ser perseverante en mis ideales.

A mis amigos y compañeros, quienes compartieron conmigo sus conocimientos y alegrías e hicieron de mi vida universitaria más amena.

Gracias a todos.

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a mi alma mater, y a todos los Ingenieros Docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería por brindarme sus conocimientos para mi formación como Ingeniero Geólogo.

A mis padres, a mi hermano, y personas especiales en mi vida, este logro es en gran parte gracias a ellos.

Agradezco de forma especial a mi asesor, Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado por su guía, paciencia y por brindarme sus conocimientos para desarrollar y concluir esta tesis.

## CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
CONTENIDO.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE FOTOS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.2 BASES TEÓRICAS.....	5
2.2.1 Movimiento de Masas.....	5
2.2.2 Deslizamientos Rotacionales.....	6
2.2.3 Desprendimiento o Caídas / Fallas.....	6
2.2.4 Factores Internos.....	7
2.2.5 Factores Externos.....	9
2.2.6 Clasificación Geomecánicas de Rocas.....	12
2.2.7 Criterios de Rotura.....	19
2.2.8 Análisis de Estabilidad de Taludes.....	30
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICO.....	32

	Pág.
CAPÍTULO III.....	34
MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	34
3.1.1 Accesibilidad.....	35
3.1.2 Clima y Precipitaciones.....	35
3.2 PROCEDIMIENTO.....	36
3.2.1 Etapa Preliminar de Gabinete.....	36
3.2.2 Etapa de Campo.....	36
3.2.3 Etapa Final de Campo.....	36
3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
3.3.1 Tipo de Diseño de la Investigación.....	38
3.3.2 Población de Estudio.....	38
3.3.3 Muestra.....	38
3.3.4 Unidad de Análisis.....	38
3.3.5 Técnicas.....	38
3.3.6 Instrumentos de Recolección de Datos.....	39
3.3.7 Equipos de Recolección de Datos.....	39
3.3.8 Análisis de Interpretación de Datos.....	39
CAPÍTULO IV.....	40
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	40
4.1 ESTRATIGRAFÍA.....	40
4.1.1 Grupo Pullucana (Ks-p).....	40
4.1.2 Grupo Quilquiñan (Ks-qm).....	41
4.1.2 Formación Cajamarca (Ks-ca).....	41
4.1.3 Formación Celendín (Ks-ce).....	42
4.1.4 Formación Chota (Pp-cho).....	43
4.2 DEPÓSITOS CUATERNARIOS.....	43
4.2.1 Lacustres (Qp-la).....	43
4.2.2 Aluvial (Qh-al).....	45

	Pág.
4.3 UNIDADES MORFOGENÉTICAS.....	45
4.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	49
4.5 GEOTECNIA.....	50
4.5.1 Zona Crítica 01: km 112+700 – km 114+100.....	50
4.5.2 Zona Crítica 02: km 114+900 – km 115+800.....	64
4.5.3 Zona Crítica 03: km 120+000 – km 120+800.....	77
4.6 PROCEDIMIENTOS DE LA INFORMACIÓN.....	90
4.7 RESULTADOS.....	91
CAPÍTULO V.....	93
5.1 CONCLUSIONES.....	93
5.2 RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS.....	97

## LISTA DE CUADROS

Pág.

Cuadro 2.1	Tabla para calcular el Índice Geológico de Resistencia. Fuente (Hoek y Marinos, 2000).....	15
Cuadro 2.2	Estimación aproximada y clasificación de la Resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índice de campo. Fuente. Gonzales de Vallejo (2002).....	16
Cuadro 2.3	Parámetros de clasificación para la clasificación geomecánica RMR. Fuente (Bieniawski 1989).....	18
Cuadro 3.1	Coordenadas UTM-WGS84 de los vértices de la zona de estudio.....	35
Cuadro 3.2	Rutas de acceso a la zona de estudio.....	35
Cuadro 4.1	Clasificación para Unidades Morfogenéticas. Fuente Rodríguez (2016).....	46
Cuadro 4.2	Unidades Morfogenéticas del área de investigación. Fuente. Rodríguez (2016).....	49
Cuadro 4.3	D y DD de las discontinuidades de la zona crítica 1.....	51
Cuadro 4.4	Valoración RMR. Zona Crítica 1.....	54
Cuadro 4.5	D y DD de las discontinuidades de la zona crítica 2.....	64
Cuadro 4.6	Valoración RMR. Zona Crítica 2.....	67
Cuadro 4.7	D y DD de las discontinuidades de la zona crítica 3.....	77
Cuadro 4.8	Valoración RMR. Zona Crítica 3.....	80
Cuadro 4.9	Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide – Zona Crítica 1.....	91
Cuadro 4.10	Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide – Zona Crítica 2.....	92
Cuadro 4.11	Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide – Zona Crítica 3.....	92

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Mecanismos de desplazamiento y colapso (Corominas y García Yagüe, 1997).....	7
Figura 2.2	Factores hidrogeológicos externos . (Sidle 1985).....	10
Figura 2.3	Relación entre la frecuencia de discontinuidades y el índice RQD. Fuente (Gonzales de Vallejo 2002).....	13
Figura 2.4	Relaciones entre esfuerzos mayores y menores para el criterio de Hoek y Brown y el equivalente de Moh – Coulomb.....	20
Figura 2.5	Envolvente de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales de los esfuerzos normales y tangenciales (Gonzales etal. 2003).....	24
Figura 2.6	Gráfico de las envolventes de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Morh Coulomb. ( Hoek 2005).....	25
Figura 2.7	Esquema estático – Método Morgenstrn – Price.....	26
Figura 2.8	El valor funcional de la función Half – sine $f(x)$ en el punto límite $x_i$ multiplicado por el parámetro $\lambda$ da como resultado el valor de inclinación del ángulo $\delta_i$ .....	27
Figura 3.1	Ubicación de la zona de estudio.....	34
Figura 3.2	Vértices de la zona de investigación.....	35
Figura 3.3	Detalle del procedimiento que se siguió para realizar la investigación.....	37
Figura 4.1	Columna Estratigráfica Local .....	44
Figura 4.2	Análisis con Dips Planar y Cuña, zona crítica 1.....	52
Figura 4.3	Análisis con Dips Vuelco, zona crítica 1.....	53
Figura 4.4	Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Bishop, Zona Crítica 1.....	55
Figura 4.5	Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Morgenstern- Price, Zona Crítica 1.....	56
Figura 4.6	Factor de Seguridad, Condiciones Normales Efectivas – Spencer, Zona Crítica 1.....	57
Figura 4.7	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Bishop, Zona Crítica 1.....	58
Figura 4.8	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Morgenstern- Price, Zona Crítica 1.....	59



Figura 4.9	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Spencer, Zona Crítica 1.....	60
Figura 4.10	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Bishop, Zona Crítica 1.....	61
Figura 4.11	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad – Morgenstern-Price, Zona Crítica 1.....	62
Figura 4.12	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Spencer, Zona Crítica 1.....	63
Figura 4.13	Análisis con Dips Planar y Cuña, zona crítica 2.....	65
Figura 4.14	Análisis con Dips Vuelco, zona crítica 2.....	66
Figura 4.15	Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Bishop, Zona Crítica 2.....	68
Figura 4.16	Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Morgenstern- Price, Zona Crítica 2.....	69
Figura 4.17	Factor de Seguridad, Condiciones Normales Efectivas – Spencer, Zona Crítica 2.....	70
Figura 4.18	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Bishop, Zona Crítica 2.....	71
Figura 4.19	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Morgenstern- Price, Zona Crítica 2.....	72
Figura 4.20	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Spencer, Zona Crítica 2.....	73
Figura 4.21	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Bishop, Zona Crítica 2.....	74
Figura 4.22	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad – Morgenstern-Price, Zona Crítica 2.....	75
Figura 4.23	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Spencer, Zona Crítica 2.....	76
Figura 4.24	Análisis con Dips Planar y Cuña, zona crítica 3.....	78
Figura 4.25	Análisis con Dips Vuelco, zona crítica 3.....	79
Figura 4.26	Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Bishop, Zona Crítica 3.....	81

	Pág.
Figura 4.27	Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Morgenstern- Price, Zona Crítica 3..... 82
Figura 4.28	Factor de Seguridad, Condiciones Normales Efectivas – Spencer, Zona Crítica 3..... 83
Figura 4.29	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Bishop, Zona Crítica 3..... 84
Figura 4.30	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Morgenstern- Price, Zona Crítica 3..... 85
Figura 4.31	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Spencer, Zona Crítica 3..... 86
Figura 4.32	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Bishop, Zona Crítica 3..... 87
Figura 4.33	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad – Morgenstern- Price, Zona Crítica 3..... 88
Figura 4.34	Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Spencer, Zona Crítica 3..... 89

## LISTA DE FOTOS

		Pág.
Foto 4.1	Calizas arcillosas grisáceas del Gpo. Pulluicana km. 114+000.....	40
Foto 4.2	Calizas y margas fosilíferas del Grupo Quilquiñan Km. 117+000.....	41
Foto 4.3	Calizas gris oscuras de la Fm. Cajamarca Km. 119+000.....	42
Foto 4.4	Calizas arenosas grises de la Fm. Celendín.....	42
Foto 4.5	Arcilla y limoarcillas grises de la Fm. Chota km. 116+000.....	43
Foto 4.6	Depósitos de conglomerados.....	44
Foto 4.7	Valle del río Marañón.....	48
Foto 4.8	Diaclasas pertenecientes a la Fm. Pulluicana.....	50
Foto 4.9	Presencia de calizas meteorizada del km 112+700 – km 114+100.....	51
Foto 4.10	Talud con presencia de diaclasas del km 114+900 – km 115+100.....	64
Foto 4.11	Taludes con característica inestables del km 120+200 – km 120+500.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

<b>a</b>	: Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing Material
<b>C</b>	: Cohesión del macizo rocoso
<b>c'</b>	: Cohesión efectiva
<b>C1, C2</b>	: Familias de discontinuidades
<b>CL</b>	: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media
<b>D</b>	: Factor de disturbancia del macizo rocoso
<b>D1, D2</b>	: familia de discontinuidades
<b>DIP</b>	: Angulo de inclinación del talud
<b>e</b>	: Espesor de las discontinuidades
<b>E</b>	: Módulo de Young o Módulo de Elasticidad
<b>Ei</b>	: Módulo de Young de la roca intacta
<b>Em</b>	: Módulo de Young del macizo rocoso
<b>F1, F2</b>	: Familias de discontinuidades
<b>FS</b>	: Factor de seguridad
<b>GSI</b>	: Índice de Resistencia Geológica
<b>GSI<sub>res</sub></b>	: Índice de Resistencia Geológica Residual
<b>m<sup>3</sup></b>	: Metros cúbicos
<b>m<sub>b</sub></b>	: Valor reducido de la constante del material m <sub>i</sub>
<b>m<sub>i</sub></b>	: Parámetro de la roca intacta obtenido de ensayos triaxiales
<b>RQD</b>	: Designación de la Calidad de la Roca
<b>RMR</b>	: Clasificación del Macizo Rocosos
<b>msnm</b>	: metros sobre el nivel de mar
<b>MPa</b>	: Megapascales.
<b>Ni</b>	: Fuerza normal actuando a la base = cos θ <sub>i</sub>
<b>s</b>	: Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
<b>S</b>	: Sur
<b>Ti</b>	: Fuerza de corte resistente en la base
<b>SUCS</b>	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
<b>SW</b>	: Suroeste
<b>UCS</b>	: Resistencia a la compresión uniaxial
<b>W</b>	: Oeste
<b>σ<sub>1</sub>'</b>	: Tensión efectiva principal mayor en el momento de la rotura
<b>σ<sub>3</sub>'</b>	: Tensión efectiva principal menor en el momento de la rotura
<b>σ<sub>h</sub></b>	: Tensión horizontal
<b>σ<sub>n</sub></b>	: Tensión normal
<b>σ<sub>v</sub></b>	: Tensión vertical
<b>φ'</b>	: Ángulo de rozamiento interno
<b>τ</b>	: Tensión tangencial
<b>WGS84</b>	: World Geodetic System 1984
<b>Xi</b>	: Representa fuerzas verticales

## **RESUMEN**

La investigación, se realizó en la carretera Celendín – Balsas, provincia de Cajamarca Km 112+000 al 121+000 donde se evidencia el comportamiento geodinámico inestable; evidenciándose afloramientos rocosos y suelos inestables en los taludes con presencia de caídas de rocas y deslizamientos. La investigación consiste en la identificación de zonas críticas mediante el análisis de inestabilidad de taludes de la carretera, las cuales determinarán la base para obtener los factores de seguridad mediante métodos computacionales; a partir de los datos obtenidos en campo y procesados en gabinete con la ayuda de software informático de Rocscience, Slide v.6.0, Dips v.6. Estas zonas críticas están influenciadas por factores geométricos, geológicos-estructurales tales como el tipo de roca, plegamientos; factores hidrológicos como la infiltración, los cuales definen la inestabilidad en los taludes. Se obtuvo los factores de seguridad de 3 zonas críticas elegidas en la exploración geotécnica. Determinándose que tres taludes se encuentran en condiciones críticas con posibilidad de colapso corto y largo plazo.

Palabras Claves: Inestabilidad de Taludes, Carretera, factores geométricos e hidrogeológicos.

## **ABSTRACT**

The investigation was carried out on the Celendín - Balsas highway, Cajamarca province Km 112 + 000 to 121 + 000, where the unstable geodynamic behavior is evident; evidencing rocky outcrops and unstable soils on the slopes with the presence of rock falls and landslides. The investigation consists in the identification of critical zones by means of the analysis of instability of slopes of the highway, which will determine the base to obtain the factors of security by means of computational methods; from data obtained in the field and processed in the cabinet with the help of computer software from Rocscience, Slide v.6.0, Dips v.6. These critical zones are influenced by geometric, geological-structural factors such as the type of rock, folds; hydrological factors such as infiltration, which define the instability in the slopes. The safety factors of 3 critical zones chosen in the geotechnical exploration were obtained. Determining that three slopes are in critical conditions with the possibility of short and long-term collapse.

Key words: Instability of slopes, road, geometric and hydrogeological factors.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

El área de investigación es una zona de alta precipitación pluvial entre los meses de octubre hasta abril, esto genera deslizamiento de roca en los cortes de la carretera, los cuales causan problemas como de comunicación, comercio. La carretera Celendín – Balsas en el tramo Km 112+000 hasta el km 121+000 se encontraron diferentes tipos de fallas inversas y de sobre escurrimiento originadas en el ciclo andino fase Inca. Se presenta gran diferencia de cotas desde los 3600 m.s.n.m en el distrito de Celendín hasta los 700 m.s.n.m en el distrito de Balsas. Esta carretera fue construida en la década de los 40. Debido a la cantidad de precipitación y los tipos de litología, la investigación se dedicó al análisis de los problemas actuales de inestabilidad.

Se delimitó zonas críticas con taludes inestables, caídas de rocas, deslizamientos de taludes, debido a factores geológicos, geométricos e hidrológicos como factor detonante, asociado al comportamiento sísmico de la zona.

En el área de investigación se ha reportado, por parte de los usuarios caídas de rocas y deslizamientos de taludes, especialmente en épocas de lluvia, en vista de ello se realizó la evaluación de inestabilidad de taludes mediante los factores de seguridad, determinándose qué factores los geométricos, geológicos, hidrogeológicos provocan esta inestabilidad.

Primero, se realizó la descripción de los afloramientos rocosos, luego la caracterización geomecánica de los taludes inestables, en seguida se realizó el análisis de las discontinuidades mediante el software Dips. Posteriormente se calculó los Factores de Seguridad con software Slide; finalmente se elaboraron los

mapas temáticos, con la finalidad de Determinar la inestabilidad de taludes en las zonas críticas en la carretera Celendín – Balsas, estos taludes son inestables, debido a factores geológicos, geométricos e hidrogeológicos y a la influencia de la geodinámica externa en los suelos y las rocas de estos taludes.

Los capítulos de la presente investigación se ordenaron de la siguiente manera: En el capítulo I se desarrolla la introducción de la investigación. En el capítulo II, se presenta los antecedentes teóricos de la investigación, conceptos, teorías y trabajos anteriores sobre el tema a nivel local, nacional e internacional como por ejemplo investigaciones realizadas en Bogotá sobre el análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín, y en el ámbito local estudios realizados en los taludes de la carretera Cajamarca - El Gavilán y la carretera Encañada – Celendín.

En el Capítulo III, se muestra los materiales y métodos de la investigación, iniciando con la ubicación geográfica y temporal, luego se despliega paso a paso el procedimiento para recuperar datos y el tratamiento análisis y presentación de resultados. En el capítulo IV, se aborda el marco geológico concerniente al tramo de carretera en estudio, donde cartografiamos la geología local, donde se describe las diferentes litologías, la geomorfología, la geología estructural. Los cuales son factores predominantes para la inestabilidad de los cortes de la carretera, donde se analiza y calcula el comportamiento geotécnico También se presenta el análisis y discusión de resultados, de acuerdo a la inestabilidad de cada talud, mediante el software Dips y Slide. En el Capítulo V, se presentan las conclusiones y recomendaciones.



## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

### **2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Wilson (1984), realizó para el INGEMMET el estudio geológico de los cuadrángulos de Chota (14-f), Celendín (14-g), concluyendo que la geodinámica actual es el resultado de la tectónica y de los procesos meteóricos, generando así diversos geoambientes cada uno con características especiales.

Montoya (2014), realizó una evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán. Donde analiza la inestabilidad de los taludes de dicha carretera, teniendo en cuenta el contexto geológico local, regional y la relación estrecha que existe con los agentes geodinámico, identifica zonas críticas altamente peligrosas, sectorizando y caracterizando por tramos los problemas de índole geotécnico.

Sanhueza y Rodríguez (2013), realizaron un análisis de estabilidad de taludes de las laderas de la quinta región de Chile con métodos determinísticos, en condiciones estáticas y pseudoestáticas, obteniendo los factores que intervienen en la inestabilidad, siendo los geológicos y estructurales los principales.

Toro y Valencia (2012), han realizado el análisis de estabilidad de dos taludes en la autopista Medellín-Bogotá, con métodos probabilísticos que evalúan la probabilidad de falla de la superficie potencias de falla que se calcula en los métodos determinísticos, como resultados se obtuvieron los factores de seguridad de estos dos taludes.

Mora y Rojas (2009), han evaluado el efecto de la infiltración en los taludes de la autopista del sol en Cuernavaca-Acapulco en dos taludes especialmente en épocas de intensas precipitaciones; concluyendo que debido al fracturamiento

presente en el macizo el cual ayuda a la infiltración y desgaste de la roca.

Torres (2015), realizó una Evaluación Geotécnica de los Deslizamientos en Taludes de la Carretera Peña Blanca - Choropampa, donde analizó el comportamiento geotécnico - geomecánico de los deslizamientos a lo largo de la carretera, determinando que la inestabilidad se debe a características litomorfoestructurales de los taludes.

Mercado (2014), realizó un cartografiado en el tramo de la carretera Cajamarca – Celendín con la finalidad de analizar la inestabilidad de los taludes en dichas zonas críticas, mediante la caracterización geomecánica y el cálculo del factor de seguridad, obteniendo tipo de litología de baja calidad así como la dirección de los estratos en contra el talud que favorecen a la inestabilidad.

Rodríguez (2016), en su tesis de maestría analizó el comportamiento geoestructural, geomorfológico, geodinámico y geomecánico de los macizos rocosos de las Formaciones Farrat, Inca, Chulec y Paritambo, que se encuentra en la zona de Ronquillo – Corisorgona, analizando la inestabilidad de dichas laderas asociadas a factores externos.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 Movimiento De Masas**

Según Jordi Corominas cuando se estudia un fenómeno complejo, como las roturas de ladera, es necesario identificar y caracterizar los distintos tipos de comportamiento y clasificarlos adecuadamente

Los movimientos en masa abarcan un conjunto de fenómenos que incluyen, entre otros, flujos de rocas, de partículas de suelo (detritos), deslizamientos, hundimientos del terreno, caída de rocas y avalanchas de nieve o rocas.

La mayoría de clasificaciones de movimientos de ladera declaran basarse en los mecanismos de inestabilidad. Sin embargo, la tipología del movimiento suele establecerse una vez que la rotura ha tenido lugar, es decir, basándose en su cinemática (Cruden y Vernes 2008).

A efectos operativos podemos distinguir dos fases principales en los movimientos de ladera: (a) la fase de previa a la rotura, que ser de larga duración. En ella se producen pequeñas deformaciones, a menudo imperceptibles pero que pueden ser de orden métrico en los grandes deslizamientos. La superficie de separación entre la masa en movimiento y el terreno no ha llegado a desarrollarse por completo (b) la fase de rotura, por lo general caracterizada por la formación de una superficie o zona de cizalla continua en el terreno con movimientos desde muy lentos a extremadamente rápidos, hasta que se produce el reajuste de la masa deslizada y el movimiento se para. En algunas ocasiones se dan fases de reactivación (Leroueil et al. 1996), en las que el movimiento se reproduce aprovechando las superficies de rotura generadas previamente.

Las condiciones de estabilidad en la fase previa a la rotura se evalúan teniendo presente la geometría inicial de la ladera, la resistencia de pico de los materiales involucrados, las condiciones de agua subterránea y el efecto de eventuales fuerzas externas (sismos, sobrecargas).

### **2.2.2 Deslizamiento Rotacionales**

La rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea y cóncava. El terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizada. El material de cabecera efectúa una inclinación contra ladera, generando depresiones donde se acumula el agua e induce nuevas reactivaciones.

Este tipo de mecanismo es característico de suelos cohesivos homogéneos y de macizos rocosos intensamente fracturados. En materiales arcillosos, especialmente si hay presencia de agua, el pie puede evolucionar hacia un deslizamiento de tierras o colada de tierras.

Los deslizamientos rotacionales, una vez producidos, son susceptibles de reactivación. El movimiento tiende a estabilizarse por disminución del momento de giro y aumento del momento estabilizador, no obstante, cualquier cambio en las condiciones piezométricas o la remoción del pie pueden dar lugar a una nueva inestabilidad. Un diagnóstico equivocado de la geometría puede llevar a la adopción de medidas de estabilización ineficaz e incluso contraproducente (Jordi Corominas).

### **2.2.3 Desprendimientos o Caídas (Falls)**

El desprendimiento se origina por el despegue de una masa de suelo o roca de una pared empinada o acantilado. El movimiento tiene lugar mediante caída libre y posterior rebote o rodadura. Es frecuente que al impactar contra la superficie del terreno, la masa caída se rompa en multitud de fragmentos. El movimiento es muy

rápido. La rotura suele producirse por deslizamiento o vuelco de pequeña envergadura, proporcionando a la masa despegada una velocidad inicial. La propagación de los desprendimientos en laderas con pendientes superiores a los  $76^\circ$  se produce preferentemente por caída libre, por debajo de este ángulo los impactos contra el terreno son frecuentes mientras que en laderas de menos de  $45^\circ$  la propagación se realiza por rodadura y, eventualmente, por deslizamiento (Corominas y García Yagüe, 1997).

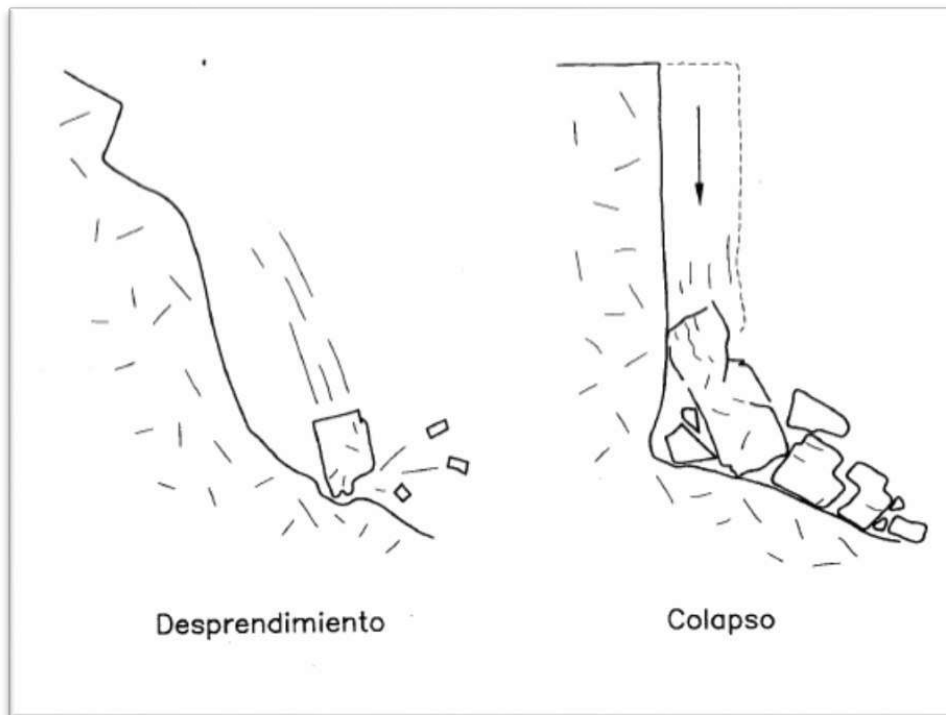


Figura 2.1 Mecanismos de desprendimiento y colapso. (Corominas y García, 1997)

#### 2.2.4 Factores Internos

En la generación de un deslizamiento se involucran diversos factores, que son los que determinan el equilibrio o desequilibrio de una masa de material, así como su intensidad, magnitud y frecuencia. Dichos factores pueden dividirse en dos grandes grupos (Corominas y García Yagüe, 1997):

### Factores Intrínsecos:

Litológicos, son los tipos de rocas y la calidad de los suelos que determinan la facilidad con que la superficie se degrada por la acción de los factores externos entre los cuales tenemos (meteorización, intemperismo).

Las características químicas, físicas, mineralógicas y genéticas de los diferentes materiales que conforman la corteza, determinan en gran parte la forma como estos evolucionan y se comportan en el ambiente (Clima) en que se encuentran.

Tectónicos, son los factores asociados al tipo, magnitud, e intensidad de la deformación que presentan los materiales rocosos, que genera en ellos elementos, tales como, foliaciones, plegamientos, fallas, diaclasas, que afectan su estructura y que condicionan su estabilidad. La importancia de las estructuras radica en que determinan zonas de debilidad por las cuales se originan los deslizamientos.

Sísmicos, Las vibraciones provocadas por sismos pueden ser lo suficientemente fuertes como para generar deslizamientos de diversa magnitud, afectando extensas áreas, (Sidle 1985).

### Factores Extrínsecos:

Geomorfológicos, Son las características morfológicas del relieve de la superficie terrestre, la expresión del nivel de desarrollo alcanzado en el proceso evolutivo. Elementos como la pendiente, agudeza, amplitud, profundidad, de dicho relieve nos dan una idea del grado de equilibrio o desequilibrio de los materiales que constituyen el relieve, y del modo o mecanismos de los procesos que se desarrollan en él, (Sidle 1985).

### **2.2.5 Factores Externos**

Climatológicos – Hidrológicos, las variables que constituyen el clima (temperatura, humedad, radiación solar) de una región determinan las condiciones de meteorización (tipo, intensidad, velocidad) a las que están expuestos los materiales.

Hidrogeológicos, el movimiento del agua a través de los suelos y rocas y el comportamiento de la presión hidrostática en estos hace de suma importancia el estudio hidrogeológico. La hidrogeología de una zona está determinada por la litología, las estructuras y el clima de una zona, esto convierte a la geología en la base de la interpretación de los datos hidrológicos.

Es así como el agua superficial y subterránea además de provocar la saturación, sobrepeso de los suelos y la variación de las presiones ejercidas en el suelo y los materiales rocosos, genera procesos tales como la socavación, erosión de taludes y la disolución de rocas solubles, entre otros.

Parámetros de Hidrogeológicos de interés, en general las propiedades hidrogeológicas más importantes que influyen en la estabilidad de una ladera tienen que ver con la cantidad de agua que se mueve en el suelo y la capacidad del mismo para almacenarla y permitir su circulación. Aquí se incluyen propiedades intrínsecas de las partículas, presión de poros y la distribución de los macroporos en la matriz de suelo (Sidle 1985).

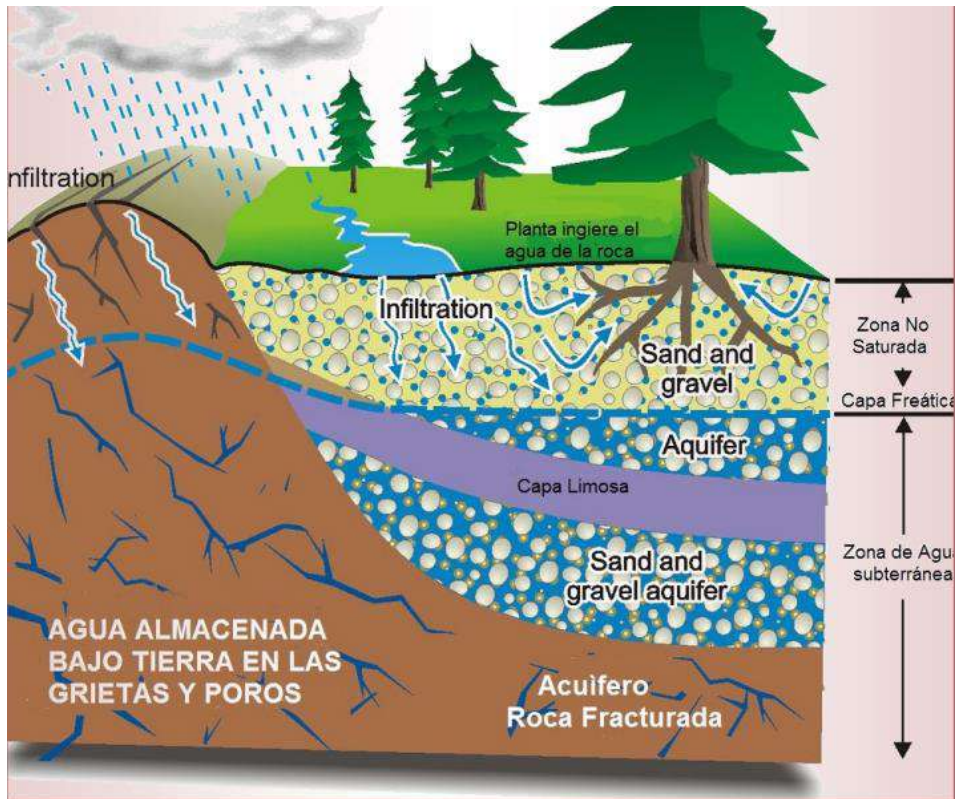


Figura 2.2 Factores hidrogeológicos externos. (Sidle 1985)

Estos factores tienen que ver con la cantidad de agua que entra en el suelo y la tasa a la cual esta se mueve ( $K$ ), la pendiente del terreno, la profundidad del nivel freático, evapotranspiración, manipulación de la ladera.

La estabilidad de los materiales está determinada por sus características intrínsecas y la ocurrencia o no de diversos procesos de carácter superficial y subsuperficial. Para el buen análisis de un fenómeno como los deslizamientos son de vital importancia, estudiar dichas características y su relación con los procesos.

Porosidad ( $n$ ): La porosidad está definida como la relación existente entre el volumen de vacíos de una masa de suelo y el volumen total que la conforma, así:

$$n = \frac{V_V}{V_T}$$



Donde  $V_V$  es el volumen de vacíos y  $V_T$ , es el volumen total.

Otra característica es la relación de vacíos que está definida como la relación existente entre el volumen de vacíos de una masa de suelo con su volumen de sólidos así:

$$e = \frac{V_V}{V_S}, \text{ Donde } V_V \text{ es el volumen de vacíos y } V_S \text{ es el volumen total.}$$

Estos dos anteriores parámetros pueden relacionarse mediante la siguiente expresión:

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

Un concepto útil en el movimiento del agua por el terreno es la porosidad eficaz, que representa el volumen de poros interconectados entre sí, esta característica está dada por la relación existente entre un llamado volumen eficaz y el volumen total del suelo. Así: Fundamentos Teóricos.

$$n_e \frac{V_e}{V_T}$$

La porosidad de los materiales es función de un gran número de factores entre los que podemos mencionar propiedades texturales como la forma, tamaño y disposición de las partículas, propiedades composicionales como el tipo de material, así como también de los procesos evolutivos del material.

Permeabilidad ( $k$ , Conductividad hidráulica): Esta propiedad está definida como la capacidad de un material para permitir el flujo a través de él. La Permeabilidad es una medida de la capacidad de un medio poroso para conducir fluidos. Implica la determinación de la capacidad de conducción de un determinado fluido.

## **Antrópicos**

Se refieren a todas las actividades mediante las cuales el hombre transforma el medio natural.

- Obras civiles
- Deforestación
- Minería
- Actividades Agrícolas
- Sobrepastoreo
- Uso del suelo

Todas estas actividades pueden alterar el equilibrio desarrollando o intensificando procesos nocivos para el terreno, que en cierta medida es naturalmente vulnerable, y (procesos morfodinámicos) que se traducen en deslizamientos.

### **2.2.6 Clasificación Geomecánica De Rocas**

Teniendo como enfoque a la competencia de las rocas, la presente tesis utilizó el GSI (geological strength index ) que es el índice geológico de resistencia de las rocas, propuesta por Hoek, Kaiser & Bawden en 1992 la cual se centra en la propiedades de los bloque de roca y de la liberación de éstos para girar o deslizarse, bajo distintas condiciones de esfuerzo ( Hoek, 2006).

La clasificación geomecánica de las rocas permite caracterizar el macizo rocoso; en esta investigación se ha realizado las siguientes clasificaciones: RQD (Rock Quality Designation), GSI (Geological Strength Index), RMR (Rock Mass Rating).

#### **Clasificación RQD (Rock Quality Designation)**

Desarrollada por Deere en 1967, determina a partir de recuperación de testigos donde los fragmentos mayores a 10 cm son sumados y divididos con la longitud total del testigo según la ecuación siguiente:

$$RQD = \frac{\sum \text{fragmentos} > a \text{ 10 cm}}{\text{longitud total del testigo}} * 100 \%$$

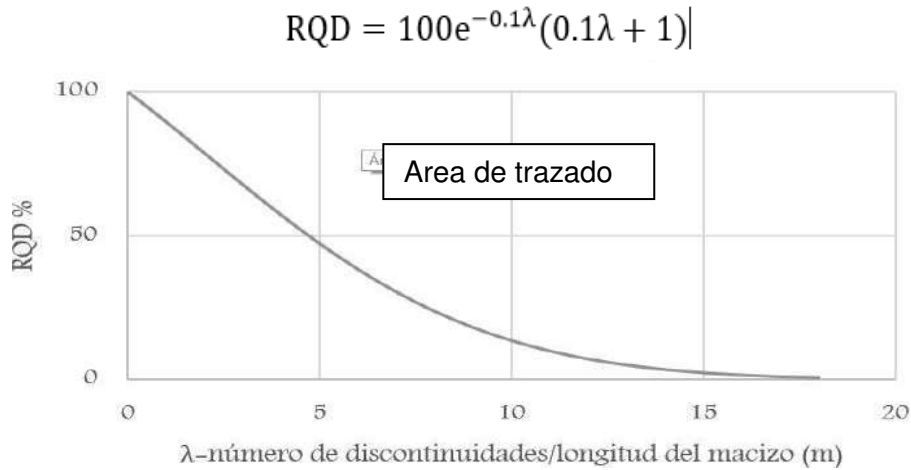


Figura 2.3. Relación entre la frecuencia de discontinuidades y el índice RQD (Gonzales de Vallejo 2002)

En el trabajo de campo se realizó la estimación del RQD a partir de la frecuencia de discontinuidades  $\lambda$  que se calcula contando el número total de discontinuidades que intercepta una longitud L.

$$\lambda = \frac{\text{número de discontinuidades}}{L(m)}$$

Y luego aplicamos la ecuación:

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

## Clasificación GSI

La clasificación GSI utiliza el siguiente cuadro de doble entrada, donde se puede estimar el valor GSI de acuerdo a las observaciones hechas en campo. Gavilanes recomienda trabajar con un rango de GSI, pero para estimaciones en este proyecto se dio un valor central aproximado.

Proporciona un número que combinado con las propiedades de la roca intacta se puede estimar la reducción de la resistencia del macizo rocoso para diferentes condiciones geológicas. Dicha reducción se debe a la mayor facilidad de fracturamiento a través y alrededor de los granos ("bloques" de la roca intacta) a medida que más granos son adicionados, y eventualmente la resistencia alcanzará un valor constante (Hoek, 2007).

Hoek, Carter, & Diederichs, 2013, realizaron la cuantificación GSI (Anexo A.6) sobre la base de las Condiciones de las Discontinuidades (Bieniawski, 1989) y el RQD (D. Deere, 1967). De esta forma el GSI puede ser calculado de la siguiente manera:

$$GSI = 1.5JCond_{89} + RDQ/2$$

Cuadro 2.1 Tabla para calcular el índice geológico de resistencia. (Hoek y Marinos, 2000)

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
CALIDAD DECRECIENTE DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES →					
 <p><b>INTACTO O MASIVO</b> Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.</p>	90			N/A	N/A
 <p><b>FORMADO POR BLOQUES</b> Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.</p>	80	70			
 <p><b>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES</b> Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.</p>		60	50		
 <p><b>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DISTORSIONADO Y BANDEADO</b> Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.</p>			40	30	
 <p><b>DESINTEGRADO</b> Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.</p>				20	
 <p><b>LAMINADO Y CIZALLADO</b> Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.</p>	N/A	N/A			10

⇓ ENCAJE DECRECIENTE ENTRE LOS TROZOS DE ROCA ⇓

### Clasificación RMR

Desarrollada por Bieniawski en 1973, mejorándolo en 1979 y 1989, es un sistema de clasificación que relaciona el índice de calidad con parámetros geotécnicos de las rocas. Estos parámetros básicos son:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturamiento RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.

Resistencia uniaxial de la matriz rocosa. Se calcula contando el número de golpes propinados con picota de geólogo y compararlo a la tabla siguiente:

Cuadro 2.2 Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo. Fuente. Gonzales de Vallejo (2002)

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
$S_1$	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,025
$S_2$	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025-0,05
$S_3$	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05-0,1
$S_4$	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,1-0,25
$S_5$	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25-0,5
$S_6$	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,5
$R_0$	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25-1,0
$R_1$	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1,0-5,0
$R_2$	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0-25
$R_3$	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
$R_4$	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
$R_5$	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
$R_6$	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

Espaciado de las discontinuidades. Este parámetro se calcula midiendo la separación de discontinuidades, sacando la media aritmética de las separaciones visibles.

Condición de las discontinuidades, obedece a cinco parámetros que son: Longitud, es decir la persistencia de las discontinuidades; Abertura, es la separación de las discontinuidades; Rugosidad, una superficie liza se puede deslizar más rápido que una rugosa; Relleno, identifica qué material rellena a la discontinuidad; y Alteración, que determina cual es el grado de meteorización de la discontinuidad.

Condiciones hidrogeológicas. El agua es uno de los factores determinantes en el comportamiento de las rocas, es así que se valora con quince cuando no hay agua y con cero cuando fluye el agua.

Esta clasificación califica a las rocas en un rango de 0 a 100, es importante hacer una zonificación del macizo rocoso de acuerdo a la continuidad de elementos como por ejemplo litología. Los cinco primeros parámetros se utilizan en superficie y el sexto se utiliza para correcciones en túneles.

En la siguiente tabla se muestra los parámetros de clasificación RMR básico.

Cuadro 2.3 Parámetros de clasificación para Clasificación Geomecánica RMR (Bieniawski 1989)

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



## 2.2.7 Criterios de rotura

### Criterio de Falla de Mohr-Coulomb

Mohr (1900) presentó su teoría sobre la ruptura de los materiales la cual afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no solo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante (Braja 2001).

Dados que muchos softwares geotécnicos utilizan este criterio, es necesario determinar los ángulos de fricción y de resistencia cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos. Esto se hace ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir de la ecuación generalizada de Hoek y Brown para un intervalo de esfuerzo principal menos definido por  $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$ , esto permitirá equilibrar las áreas por encima y debajo de la curva de Mohr Coulomb. Como resultado obtenemos las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción  $\phi'$  y la resistencia cohesiva  $C'$ :

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$
$$C' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1+a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}}$$

Siendo  $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci}$ , donde  $\sigma'_{3max}$  el límite superior del esfuerzo de confinamiento sobre el que se ha considerado la relación de los criterios de Mohr-Coulomb y de Hoek Brown, ha sido determinado para cada caso individual.

La resistencia al corte de Mohr – Coulomb  $\tau$  para un esfuerzo normal dado  $\sigma'_n$ , Se encuentra sustituyendo estos valores de  $C'$  y  $\phi'$  en la ecuación:

$$\tau = C' + \phi' \tan \phi'$$

La gráfica equivalente, en términos de esfuerzos principales menores y mayores, está definida por:

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3$$

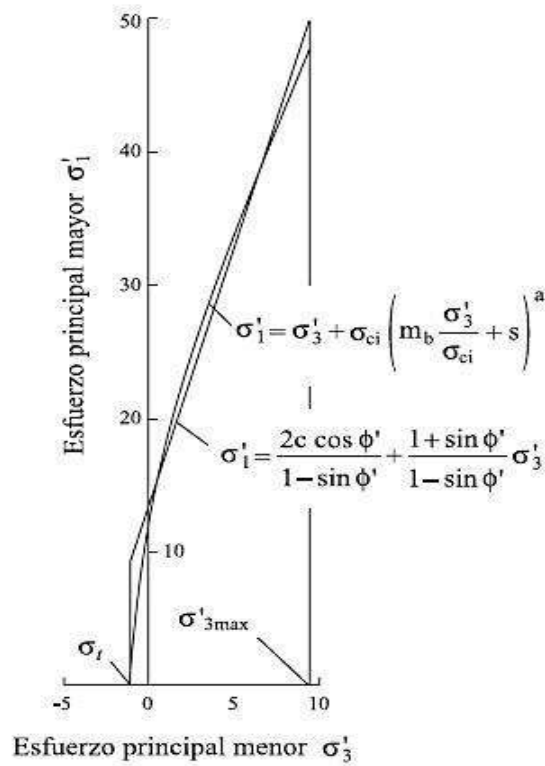


Figura 2.4 Relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek y Brown y el equivalente de Mohr – Coulomb

## Criterios de rotura de macizos rocosos (Teoría de Hoek-Brown)

Hoek y Brown en 1980 introdujeron su criterio de rotura en un intento de proporcionar los datos de partida para el análisis necesario en el diseño de excavaciones subterráneas en roca competente, el criterio se dedujo de los resultados de las investigaciones Hoek de roturas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown. Trabaja directamente con el RMR de Bieniawski en las observaciones geológicas realizadas en campo.

Uno de los principales problemas que se presentan en el ámbito geotécnico y especialmente en la estabilidad de taludes, es que es más conveniente tratar el criterio original de Hoek y Brown en términos de esfuerzos normales al corte más que en términos de esfuerzos principales, según la ecuación original:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

Donde:

- ✓  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  con los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento 1 y 3 de rotura.
- ✓  $\sigma_{ci}$  es la resistencia a la compresión uniaxial del material intacto.
- ✓ m y s son las constantes del material, donde s = 1 para roca intacta.

Hoek sugirió que la resistencia cohesiva determinada al ajustar una tangente a la envolvente curvilínea de Mohr es un valor sobredimensionado y puede dar unos resultados óptimos en los cálculos de estabilidad.

En 1997 se reconoció que el RMR de Bieniawski no era adecuado para relacionar el criterio de rotura con las observaciones geológicas en campo.

Por ello se condujo a la introducción del Índice de la Resistencia Geológica, GSI (Geological Strength Index) por Hoek , Wood y Shah, Hoek y Hoek, káiser Y Bawden. Este índice fue extendido posteriormente a macizos rocosos débiles a través de una serie de artículos propuestos por Hoek, Marinos y Benisi. Hoek y Marinos, y Marinos y Hoek.

### ***Criterio de Hoek Y Brown Generalizado***

La forma de la curva de la tensión principal o la envolvente de Morh podría ajustarse por medio de un coeficiente variable,  $a$ , en lugar del término de a raíz cuadrada de la ecuación original.

Este se expresa como:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde  $m_b$  es un valor reducido de la constante del material  $m_i$  y está dado por:

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

$s$  y  $a$  son constantes del macizo rocoso dada por:

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

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

D es un factor que depende sobre todo del grado de la alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de voladura o por relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo  $\sigma' = 0$  en la ecuación principal, dando así:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} S^a$$

Y siendo la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = - \frac{s\sigma_{ci}}{bm}$$

Los esfuerzos normales y de cizalla están relacionados a los esfuerzos principales por la siguiente ecuación (Hoek et al., 2002):

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_n + \sigma'_s}{2} - \frac{\sigma'_n + \sigma'_s}{2} * \frac{d\sigma'_1/\sigma'_3 - 1}{d\sigma'_1/\sigma'_3 + 1}$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1}$$

$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b(m_b\sigma'_3/\sigma'_{ci} + s)^{a-1}$$

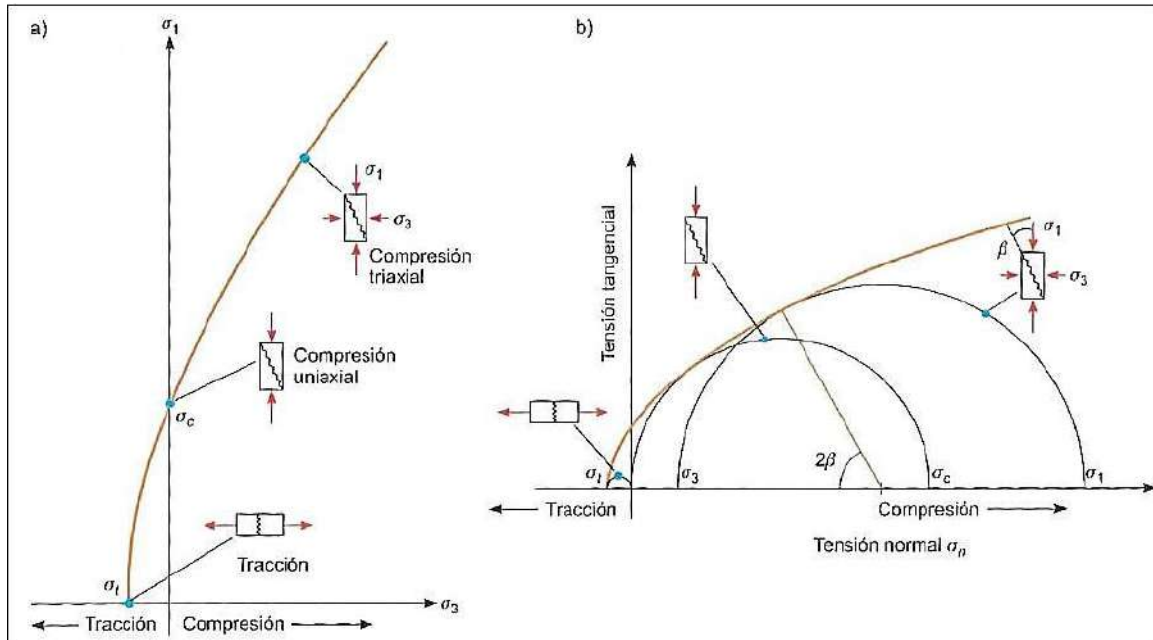


Figura 2.5 Envolvente de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales de los esfuerzos normales y tangenciales (Gonzales et al. 2003)

### **Resistencia Global del Macizo Rocosó**

El fallamiento inicia cuando  $\sigma_c$  (resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso Ecuación 12.) es superada por la tensión inducida y se propaga un campo de tensión biaxial hasta estabilizarse cuando la fuerza local, Ecuación 4, es mayor que las tensiones  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  inducidas. Sin embargo, en ocasiones es útil considerar el comportamiento “global” de un macizo rocoso en lugar de detallar este proceso de fallamiento (Hoek, 2005):

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Con  $c'$  y  $\phi'$  determinados por los rangos de tensiones  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{ci} / 4$  dando:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} * \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

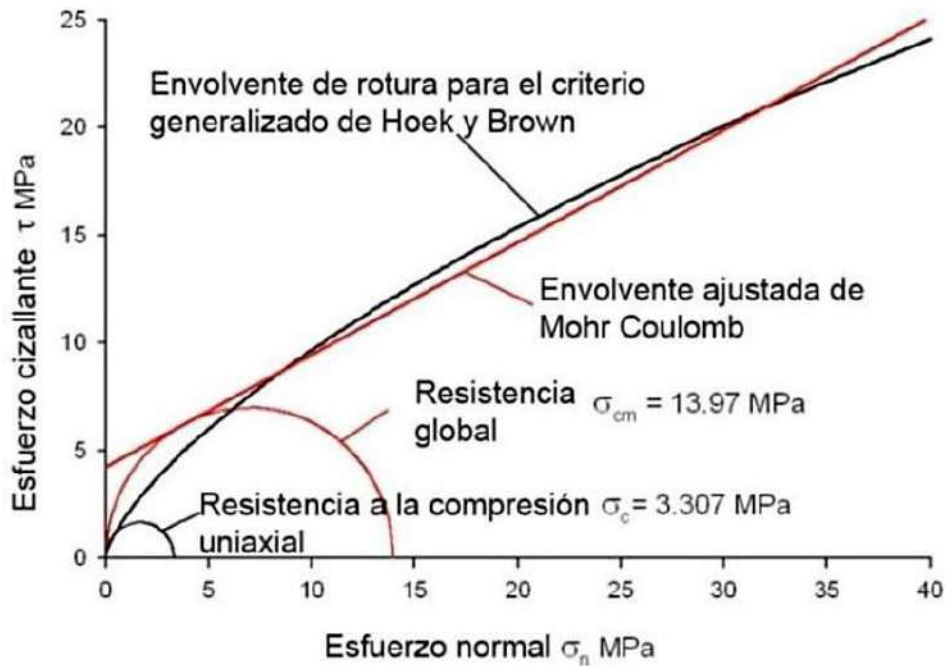


Figura 2.6 Gráfico de las envolventes de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Mohr Coulomb. (Hoek, 2005).

- **Morgenstern-Price**

El método Morgenstern-Price es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Los bloques son creados dividiendo el suelo sobre la superficie terrestre dividiendo planos. Las fuerzas actuando en bloques individuales se muestran en la siguiente figura 2.7.

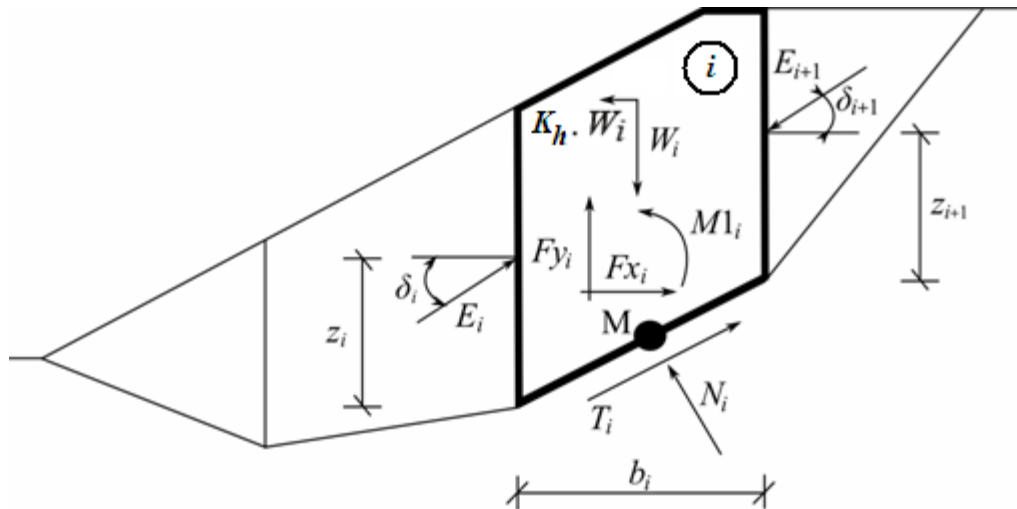


Figura 2.7 Esquema estático – Método Morgenstern-Price

Cada bloque se asume para contribuir a la misma fuerza como en el método Spencer. Los siguientes supuestos se introducen en el método Morgenstern-Price para calcular el equilibrio límite de las fuerzas y momento de los bloques individuales:

Los planos divididos entre bloques son siempre verticales, la línea de acción de peso del bloque  $W_i$  pasa por el centro del segmento  $i$ th de la superficie de deslizamiento representada por el punto M.

La fuerza normal  $N_i$  actúa en el centro del segmento  $i$ th de la superficie de deslizamiento, en el punto M

La inclinación de las fuerzas  $E_i$  que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque ( $\delta_i$ ) al punto extremo de la superficie de deslizamiento  $\delta = 0$



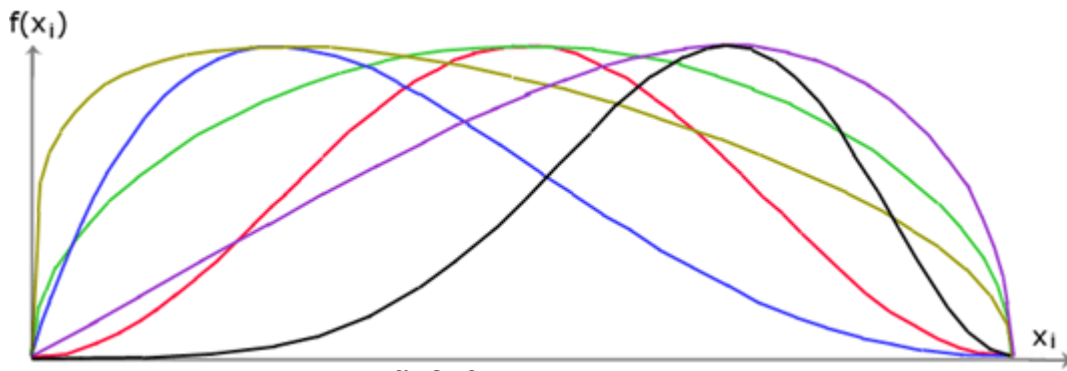


Figura 2.8 El valor funcional de la función Half-sine  $f(x_i)$  en el punto límite  $x_i$  multiplicado por el parámetro  $\lambda$  da como resultado el valor de la inclinación del ángulo  $\delta_i$ .

La solución adopta la expresión (1) – (5), mostrando el método Spencer, es decir:

$$N_i = N'_i + U_i \quad (1)$$

$$T_i = (N_i - U_i)\tan\varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos\alpha_i} = N'_i \tan\varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos\alpha_i} \quad (2)$$

$$N'_i + U_i - W_i \cos\alpha_i + K_h \cdot W_i \cdot \sin\alpha_i + F_{y_i} \cdot \cos\alpha_i - F_{x_i} \cdot \sin\alpha_i \quad (3)$$

$$E_{i+1} \cdot \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

$$N'_i \frac{\tan\varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} + \frac{b_i}{FS} - W_i \cdot \sin\alpha_i - K_h \cdot W_i \cdot \cos\alpha_i + F_{y_i} \cdot \sin\alpha_i \quad (4)$$

$$F_{x_i} \cos\alpha_i - E_{i+1} \cdot \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_{i+1} \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

$$\begin{aligned}
& E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1} \left( Z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \cdot \sin \delta_{i+1} \cdot \frac{b_i}{2} - \\
& E_i \cdot \cos \delta_i \left( Z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \cdot \sin \delta_i \cdot \frac{b_i}{2} + \\
& M1_i - K_h W_i (y_M - y_{gi}) = 0
\end{aligned} \tag{5}$$

- (1) Relación entre el valor de la tensión efectiva y tensión total de la fuerza normal actuando en la superficie de deslizamiento.
- (2) Condición de Mohr-Coulomb representa la relación entre la fuerza normal y la fuerza de corte en un segmento dado de la superficie de deslizamiento (Ni a Ti).
- (3) Fuerza de la ecuación de equilibrio en la dirección normal del segmento ith de la superficie de deslizamiento.
- (4) Fuerza de la ecuación de equilibrio a lo largo del segmento ith de la superficie de deslizamiento.
- (5) Momento de la ecuación de equilibrio sobre el punto M

Modificando las fuerzas de las ecuaciones (3) y (4) se obtiene la siguiente fórmula recursiva:

$$E_{i+1} \frac{[(W_i - F_i) \cdot \cos \alpha_1 - (K_h \cdot W_i - F_{xi}) \cdot \sin \alpha_1 - U_i + E_i \cdot \sin(\alpha_1 - \delta_1)] \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} \cdot \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_1} - (W_i - F_{yi}) \cdot \sin \alpha_1 - (K_h \cdot W_i - F_{xi}) \cdot \cos \alpha_1 + E_i \cdot \cos(\alpha_1 - \delta_1)}{\sin(\alpha_1 - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_1 - \delta_{i+1})}$$

Esta fórmula permite calcular todas las fuerzas  $E_i$  actuando entre los bloques para un valor dado de  $\delta_i$  y SF. Esta solución asume que en el origen de la superficie de deslizamiento el valor  $E$  es conocido e igual a  $E_1 = 0$ .

Adicionalmente la fórmula recursiva (7) sigue la ecuación de momento de equilibrio

(5) como:

$$Z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} [E_{i+1}(\sin\delta_{i+1} - \cos\delta_{i+1} \cdot \tan \alpha_i) \cdot E_i(\sin\delta_i - \cos\delta_i \cdot \tan \alpha_i)] + E_i \cdot z_i \cdot \cos\delta_i - M1_i + K_h \cdot W_i \cdot (y_M - y_{gi})}{E_{i+1} \cdot \cos\delta_{i+1}} \quad (7)$$

Esta fórmula permite calcular todos los brazos  $z_i$  de las fuerzas actuando entre los bloques para un valor dado de  $\delta_i$ , conociendo el valor del lado izquierdo en el origen de la superficie de deslizamiento, donde  $z_1=0$ .

El factor de seguridad FS es determinado empleando el siguiente proceso de interacción:

Los valores iniciales de los ángulos  $\delta_i$  se determinan según la función Half-sine ( $\delta_i = \lambda^* f(x_i)$ ).

El factor de seguridad FS para los valores dados de  $\delta_i$  deduce de la ecuación (6), asumiendo el valor de  $E_{n+1} = 0$  en el extremo de la superficie de deslizamiento.

El valor de  $\delta_i$  está dado por la ecuación (7) utilizando los valores de  $E_i$  determinados en el paso previo con el requisito de tener el momento en el último bloque igual a cero. Los valores funcionales de  $f(x_i)$  son los mismos todo el tiempo durante la iteración, solo se itera el parámetro de  $\lambda$ . La ecuación (7) no provee el valor de  $z_{n+1}$  ya que éste es igual a cero. Éste valor se satisface con la ecuación de momento de equilibrio (5).

Es necesario evadir las soluciones inestables para que el proceso de iteración sea exitoso. Estas inestabilidades ocurren cuando toma lugar la división por cero en la expresión (6) y (7). En la ecuación (7) dividir por cero se encuentra por  $\delta_i = \pi/2$  o  $\delta_i = -\pi/2$ . Por lo que, el valor del ángulo  $\delta_i$  debe ser encontrado dentro del intervalo  $(-\pi/2; \pi/2)$ .

La división por cero en la expresión (6) aparece cuando:

$$FS = \tan\varphi_i \cdot \tan(\delta_{i+1} - \alpha_i)$$

Otra comprobación para prevenir inestabilidad numérica es la verificación de parámetros  $m_\alpha$  – se satisface siguiendo las siguientes condiciones.

$$m_\alpha = \cos\alpha_i + \frac{\sin\alpha_i \cdot \tan\varphi_i}{FS} > 0,2$$

Por lo tanto, antes de ejecutar la iteración es necesario encontrar el valor crítico más alto de SFmin que satisfaga las condiciones antes mencionadas. Los valores por debajo de éste valor crítico SFmin se encuentran en un área de solución inestable, por lo que la iteración comienza configurando SF a un valor por encima de SFmin y todos los valores resultantes de SF de las iteraciones ejecutadas son mayores a SFmin.

Generalmente los métodos rigurosos convergen mejor que los métodos simples (Bishop, Fellenius). Ejemplos con problemas convergentes incluyen dos secciones de superficie de deslizamiento empinada, geometría compleja, salto significativo en sobrecargas etc. Si no se obtiene resultado, recomendamos un pequeño cambio en los datos de entrada, ejemplo: superficie de deslizamiento menos empinada, ingreso de más puntos dentro de la superficie de deslizamiento, o utilizar alguno de los métodos simples.

## 2.2.8 Análisis de estabilidad de taludes

### Factor de seguridad

La tarea de ingeniero encargado de analizar la estabilidad de un talud es determinar el factor de seguridad, (Brajan 1984) define a éste como:

$$FS_s = \frac{T_f}{\tau_d}$$

$FS_s$  = Factor de seguridad respecto a la resistencia.

$\tau_f$  = Resistencia cortante del suelo.

$\tau_d$  = Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie de falla.

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

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

$c$  = Cohesión

$\phi$  = Ángulo de fricción drenada.

$\sigma'$  = Esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla.

### **Análisis de Taludes mediante el Método de las Dovelas**

El análisis por estabilidad usando el método de las dovelas consiste en dividir la superficie de falla de prueba en varias dovelas verticales. El factor se halla mediante la fórmula y se expresa como sigue; (Braja1984):

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

Bishop (1955), propuso una solución más refinada para el método ordinario de las dovelas y la ecuación toma la siguiente forma:

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c b_n + W_n \tan \phi) \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} w_n \sin \alpha_n}$$

## **Análisis de taludes mediante dovelas para infiltración con flujo establecido**

Para una infiltración de estado permanente a través de taludes, como es la situación en muchos casos prácticos, la presión del agua de poro tiene que tomarse en cuenta cuando se usan parámetros de resistencia cortante efectiva. (Braja 1984).

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [cb_n + (W_n - u_n b_n) \tan \phi]}{\sum_{n=1}^{n=p} w_n \sin \alpha_n} ; u_n = H_n \gamma_n$$

## **Solución de Bishop y Morgenstern para estabilidad de taludes simples con infiltración**

Solución de Bishop y Morgenstern (1960) para la estabilidad de taludes simples con infiltración:

$$FS_s = \left[ \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=p} \frac{b_n z_n}{H H}} \right] \times \sum_{n=1}^{n=p} \left\{ \frac{\frac{c}{H \gamma} \frac{b_n}{H} + \frac{b_n z_n}{H H} (1 - r_{u(n)}) \tan \phi}{m_{\alpha(n)}} \right\} = m' - n' r_u$$

Donde  $m'$  y  $n'$  son coeficientes de estabilidad generados anteriormente y mostrados en tablas.

### **2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS**

**Ángulo de Fricción Interna.** Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad y fue descrito inicialmente por Amonton en el año 1699 (Lambe y Whitman 1991).

**Cohesión.** Adherencia de los fragmentos, partículas o granos de las rocas, que ejercen unos a otros ayudados por la matriz o cementante. El grado de diagénesis o litificación se manifiesta en la cohesión de los fragmentos, a mayor diagénesis mayor cohesión (Dávila 2011).

**Diaclasas.** Fractura o juntura que aparece en el cuerpo de una roca ocasionalmente producida por los esfuerzos tectónicos, presentando direcciones definidas a las cuales se les denomina sistemas de diaclasas (Dávila 2011).

**Falla.** Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado “plano de falla”. Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogénesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas (Dávila 2011).

**Macizo Rocoso.** Masa rocosa afectada por discontinuidades o superficies de debilidad. (González de Vallejo 2002).

**Matriz Rocosa.** Separación de la masa rocosa en bloques o roca intacta. (González de Vallejo 2002).

**Talud.** Una superficie de terreno expuesta situada a un ángulo con la horizontal se llama talud o pendiente no restringida, y puede ser natural o construido (Braja 1984).

**Inestabilidad.** Alteración del estado tensional de un macizo rocoso causado por presencia de discontinuidades, factores geométricos, geodinámica externa y factores geotécnicos (Dávila 2011).

## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La zona de investigación se ubica al SE de la Ciudad de Cajamarca, entre el Km 112+000 hasta el km 121+000 de la carretera de Celendín – Balsas, en el sector conocido como Utco.

Políticamente en la república del Perú, región Cajamarca y Amazonas distritos de Celendín, Utco y Balsas. Las coordenadas de los vértices de la zona de estudio se especifican en la Tabla 4 en el sistema UTM, Datum WGS 84 y zona 17S y se observan en la Figura 3 (Anexo Plano1).

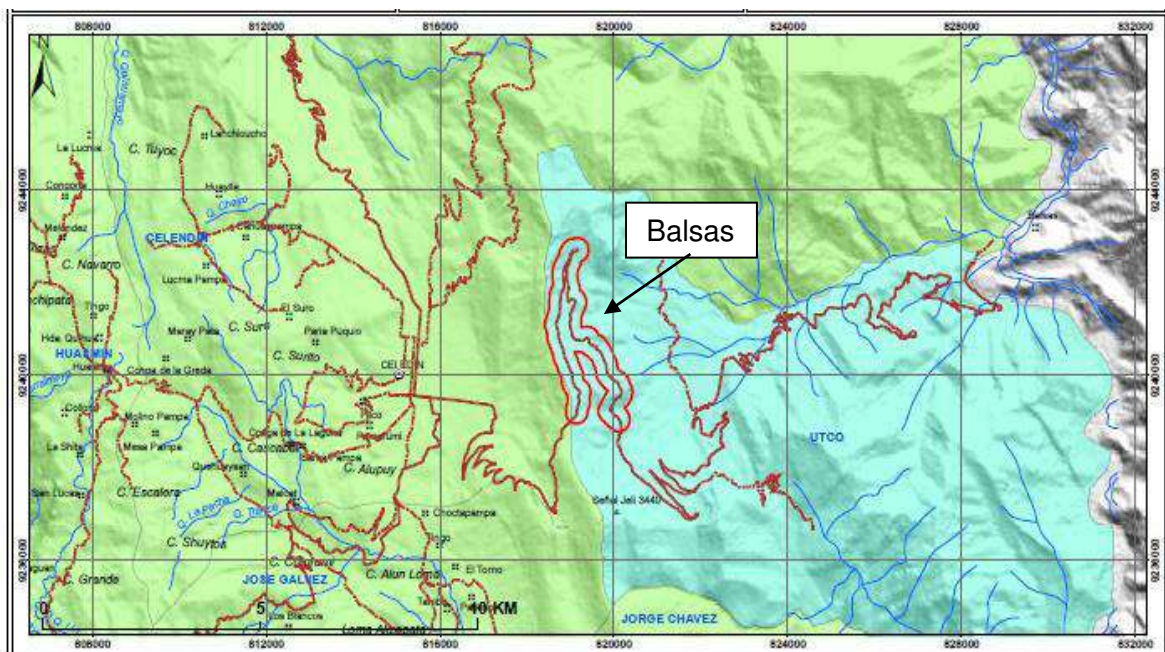


Figura 3.1 Ubicación de la zona de estudio.



Cuadro 3.1 Coordenadas UTM-WGS84 de los Vértices de la zona de estudio.

VÉRTICE	ESTE	NORTE
V1	818000	9244000
V2	822000	9244000
V3	822000	9238000
V4	818000	9238000



Figura 3.2 Vértices de la zona de Investigación

### 3.1.1 Accesibilidad

El acceso a la zona de estudio se puede acceder desde Cajamarca a través del Km 100 de la carretera asfaltada.

Cuadro 3.2 Rutas de acceso a la zona de estudio.

TRAMO	DISTANCIA (km)	TIEMPO (min)	ESTADO
Cajamarca – Celendín	107 km	150	Asfaltada
Celendín – Utco	9 km	15	Asfaltada

### 3.1.2 Clima y Precipitaciones

El clima es templado y seco, con una media anual de 13.7°C (según la estación de SENAMHI Celendín), con altura promedio de 2900 m.s.n.m.

Las precipitaciones en los meses de Setiembre a Abril son torrenciales y los meses sin precipitaciones están entre Mayo y Agosto, presentando heladas en las zonas altas.

Es de carácter cíclico a través de los meses y años, el mes más seco es Agosto mientras que el mes más lluvioso es Marzo, la precipitación es la más baja en Agosto, con un promedio de 18 mm. En marzo, la precipitación alcanza su pico, con un promedio de 125 mm. (SENAMHI Celendín)

## **3.2 PROCEDIMIENTOS**

### **3.2.1 Etapa Preliminar de Gabinete**

Esta etapa consistió en la búsqueda de libros, estudios, investigaciones, tesis y papers relacionados con inestabilidad de taludes, asociados principalmente a factores geométricos; factores geológicos-estructurales.

### **3.2.2 Etapa de Campo**

La segunda etapa comprendió la ubicación de las zonas críticas comprendidas en el tramo Km 112+000 hasta el km 121+000, haciendo una descripción geológica, estructurales, geotécnicos para saber con mayor precisión los factores que provocaron esta inestabilidad y por ende los constantes deslizamientos y caídas de roca.

### **3.2.3 Etapa Final de Gabinete**

En esta etapa obtenida la data tomada en campo, se procedió a analizar en gabinete, y con la ayuda de software de Rocscience se puede obtener los factores de seguridad de 3 zonas críticas elegidas en la exploración geotécnica. Llegando a determinar que tres taludes se encuentran en condiciones altamente

críticas con posibilidad de colapso. Además, para la elaboración de los planos se utilizó el software ArcGis 10.3.

Finalmente, esta etapa nos presenta las conclusiones de la tesis de investigación “Determinación De La Inestabilidad De Taludes En Las Zonas Críticas En La Carretera Celendín – Balsas”.

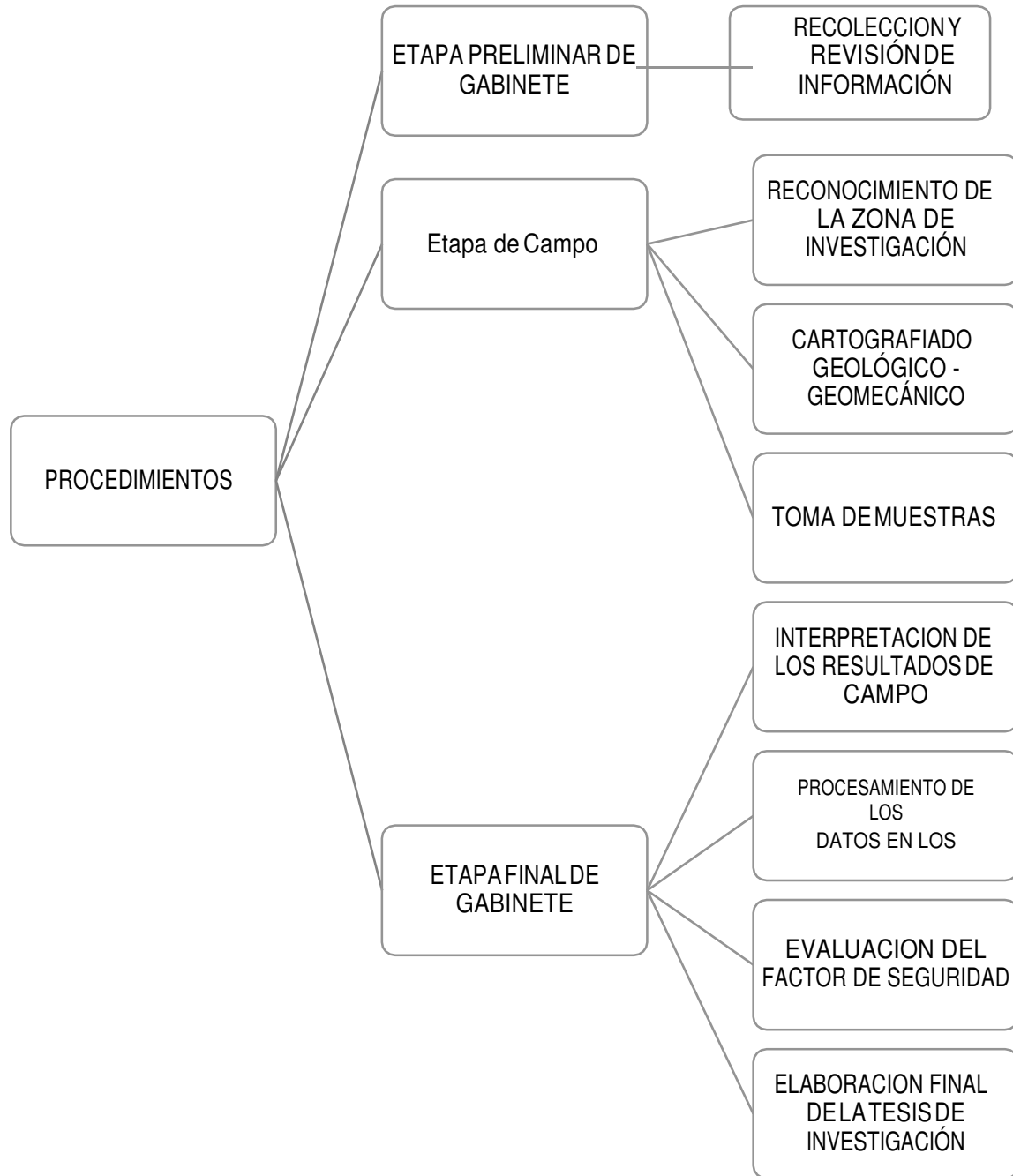


Figura 3.3 Detalle del procedimiento que se siguió para realizar la investigación.

### **3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.3.1 Tipo y Diseño de Investigación**

Es de tipo no experimental, transversal, asociado al diseño de investigación descriptivo, correlacional y explicativo.

La metodología utilizada para la investigación, comprendió un diseño de investigación descriptiva, pasando por la correlacional para terminar con un proceso explicativo. Es por ello que se inició describiendo la situación problemática, los factores que intervienen, luego se correlacionaron con otras variables como factores estructurales, para finalmente explicar el por qué se produjo la inestabilidad de estas zonas críticas.

#### **3.3.2 Población de Estudio**

Los taludes ubicados en el tramo Km 112+000 hasta el km 121+000, teniendo una longitud de 9 km. de la carretera Celendín – Balsas.

#### **3.3.3 Muestra**

Taludes en las zonas críticas que evidencian inestabilidad por la geología, geometría, hidrología y sismicidad.

#### **3.3.4 Unidad de análisis**

Factores de seguridad, litología, deslizamientos, precipitaciones del tramo Km 112+000 al Km 121+000, carretera Celendín-Balsas

#### **3.3.5 Técnicas**

- Observación, caracterización
- Análisis de documentación

### **3.3.6 Instrumentos y Recolección de datos**

Se trabajó en campo con tablas para la recolección de datos, se utilizó para un Registro Geotécnico de las tres zonas críticas.

### **3.3.7 Equipos de recolección de datos**

- ✓ Picota marca estwing mango largo: Herramienta necesaria para extraer muestras de roca y probar la resistencia de las mismas en campo.
- ✓ Lápiz rayador 88CM General Tools: Herramienta utilizada para identificar minerales por medio de su dureza relativa.
- ✓ Lupa de 10x Baush & Lamp. Herramienta óptica utilizada para visualizar mejor los cristales de una roca.
- ✓ Lápices y lapiceros: Utilizados para anotaciones y cartografiado.
- ✓ Cámara digital Cannon Power Shot: Instrumento utilizado para el registro fotográfico.
- ✓ Protactor: Escala 1/1000: Utilizado para el cartografiado local.
- ✓ Brújula Brunton mod. 5006: Utilizado para la toma de datos de direcciones de discontinuidades y planos de estratificación
- ✓ GPS Garmin eTrex 20: Instrumento utilizado para la obtención de las coordenadas para la ubicación de puntos.

### **3.3.8 Análisis e interpretación de datos**

El análisis e interpretación de datos se realizó en gabinete, utilizando los resultados obtenidos en campo. Los datos permiten evaluar la calidad de la roca según la clasificación RMR de Bieniawski, para luego calcular el factor de seguridad con la ayuda del software geotécnico Slide y realizar el análisis estructural. En el caso de que la roca se encuentre muy fracturada se realiza la clasificación a través GSI. Además de ArcMap 10.3 (Software utilizado para la creación de los planos), AutoCAD 2016 (Sirvió como base para la obtención de los perfiles topográficos) y Microsoft Office 2013 Word, Excel, PowerPoint (Software utilizados para la elaboración de los informes y presentaciones).

## CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. ESTRATIGRAFÍA

La secuencia pertenece al Cretácico superior, y parte de Paleógeno (Fm. Chota), es mayormente calcarea-limoarcillita, donde se identifican los Grupos Pulluicana y Quilquiñan, las Formaciones Cajamarca y Formación Chota, las cuales se describen a continuación:

#### 4.1.1 Grupo Pulluicana (Ks-p)

La litología predominante es caliza grisácea, que se intemperiza a un color marrón claro y que se presenta en capas medianas, nodulares e irregularmente estratificadas. Intercaladas con las calizas, se observa capas de margas marrones y lutitas grisáceas, así como algunas capas de limolitas.

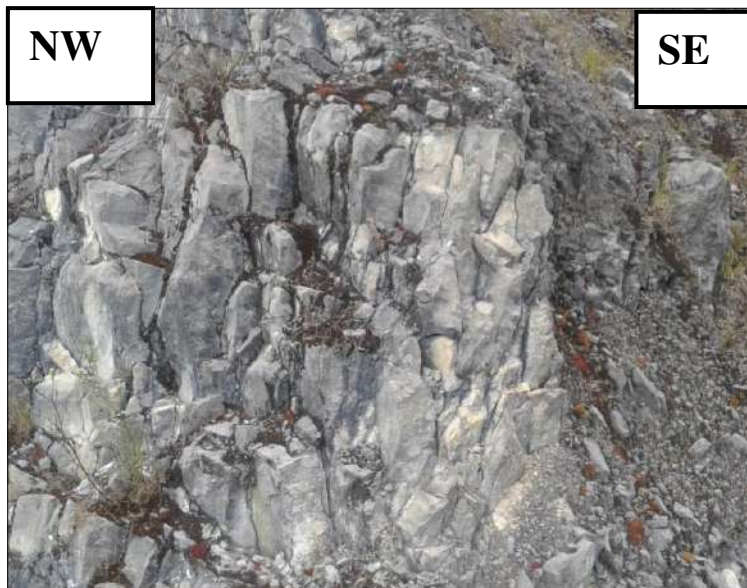


Foto 4.1 Calizas arcillosas grisáceas del Gpo. Pulluicana. Km. 114+000

#### 4.1.2 Grupo Quilquiñan (Ks-qm)

Tiene una litología la cual está conformada principalmente por calizas nodulares macizas, capas de lutitas y margas fosilíferas con una coloración amarillenta. Esta Formación yace concordantemente sobre la Grupo. Pulluicana y con la misma relación infrayace a la Formación Cajamarca.



Foto 4.2 Calizas y margas fosilíferas del Grupo Quilquiñan Km.117+000

#### 4.1.3 Formación Cajamarca (Ks-ca)

Tiene una litología bastante uniforme a través de la región la cual consiste en calizas gris oscuras, con delgadas capas de lutitas y margas. Las calizas se presentan en bancos gruesos con escasos fósiles. Esta Formación yace concordantemente sobre la Grupo. Quilquiñán y con la misma relación infrayace a la Formación Celendín.



Foto 4.3 Calizas gris oscuras de la Fm. Cajamarca. Km.119+000

#### 4.1.4 Formación Celendín (Ks-ce)

La Formación Celendín presenta intercalaciones de calizas margosas algo nodulosas en capas delgadas, así mismo calizas arenosas color gris amarillento, sobre todo en la parte superior.



Foto 4.4 Calizas arenosas grises de la Fm. Celendín km 120+000



#### 4.1.5 Formación Chota (Pp-cho)

Constituido por sedimentos arcillosos tales como lutitas, y margas, de color rojo y marrón amarillento, con intercalaciones de areniscas finas grises. Las lutitas se presentan en estratos gruesos, contienen algunos clastos de material cuarzoso que aumentan hacia el tope en algunas capas.



Foto 4.5 Arcilla y limos de la Fm. Chota km. 116+000




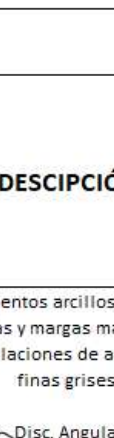
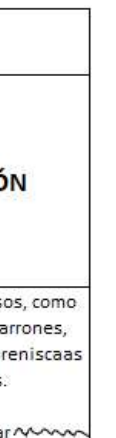

## 4.2 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

### 4.2.1 Depósito Lacustre (Qp-la)

Los depósitos lagunares se encuentran en diferentes lugares y niveles, dispuestos en capas sub horizontales constituidos por material fino areno-arcilloso, a los que algunas veces se intercalan gravas y delgados conglomerados.



Foto 4.6 Depósitos de conglomerados

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA						
ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITO ESTRATIGRÁFICA	POTENCIA	ESTRATIGRAFÍA	DESCIPCIÓN
CENOZOICO	PALEÓGENO	EOCENO PALEOCENO	Formación Chota	500		Sedimentos arcillosos, como lutitas y margas marrones, intercalaciones de areniscas finas grises.
						
MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR	Formación Celendín	200		Calizas margosas con capas delgadas, calizas arenosas de color gris.
			Formación Cajamarca	600-700		Calizas oscuras, capas delgadas de lutitas y margas. Calizas de bancos gruesos.
			Grupo Quilquiñán	500		Calizas nodulares, capas de lutitas y margas fosilíferas de color amarillenta
			Grupo Pulluicana	700		Caliza grisácea, intemperzada, se observan argas marrones y lutitas grisáceas. Algunas limonitas.

4.1 Figura Columna Estratigráfica Local (Rivasplata)

#### 4.1 Figura Columna Estratigráfica Local (Rivasplata)

#### **4.2.2 Depósito Aluvial (Qh-al)**

Dentro de los depósitos aluviales se han considerado los materiales con poco transporte, depósitos que se acumulan en áreas favorables en los flancos de los valles y quebradas tributarias, están conformados por conglomerados polimícticos poco consolidados, con clastos de tamaño heterogéneo englobados en una matriz limo arcillosa.

### **4.3 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS**

Conformadas las estructuras geológicas por los procesos geotectónicos entre el Cretácico Superior hasta el Eoceno Paleoceno. Las geoformas están directamente relacionadas con los procesos de erosión y acorde con su génesis u origen, edad de las rocas, geometría del relieve y tipo de relieve (Tapia-Varela y López- Blanco 2001).

La clasificación de unidades morfológicas realizada por el Gobierno Regional Cajamarca, en su documento Zonificación Ecológica y Económica de Cajamarca (ZEE, 2011), con 4 clases y 28 subclases, es bastante amplia y frondosa, además complicada para ser utilizada en áreas pequeñas, como en la zona de investigación.

Es por ello que, para las geoformas o unidades morfogenéticas (UM) que se encontraron en la zona se han definido según la clasificación que se muestra en el cuadro , considerándose para áreas pequeñas y cuyas variables base fueron las propuestas por (Tapia-Varela y López-Blanco 2001) y modificadas por (Rodríguez 2016), las cuales se denominaron: planicies, lomadas, laderas y escarpas; cuya clasificación es bastante simple, concreta y económica cuando se trata de definir el comportamiento y estabilidad de lugares con problemas geodinámicos y geotécnicos.

Cuadro 4.1 Clasificación para Unidades Morfogenéticas (Rodríguez 2016)

TIPO DE RELIEVE	GEOMETRIA	LITOLOGÍA	ORIGEN	EDAD DE LA LITOLOGIA		
UNIDAD MORFOGENETICA (UM)	PENDIENTE	ASOCIADA A SU COMPOSICIÓN	ASOCIADO AL EVENTO O AL PROCESO GEOLÓGICO	PERIODO	EPOCA	EDAD
Planicies	0° - 8°					
Lomadas	8° - 20°					
Laderas	20° - 50°					
Escarpas	50° <					

### Planicies (0° a 8°)

Se ha denominado planicie a una superficie bastante homogénea, poco cambiante en su morfología, ligeramente ondulada, poca erosión actual y fácil de manejar para actividades agrícolas y ganaderas. Está afectada por los procesos de erosión pluvial y puede encontrarse en cualquier lugar del área.

En el trayecto de la carretera encontramos dos áreas con estas características y deben su conformación a los remanentes topográficos de la superficie de erosión. Presentan una cobertura de depósitos fluvio – aluviales y deluvio – coluviales, que cubren las rocas del substrato rocoso de la cuenca del cretáceo, tienen el aspecto de paisajes llanos abiertos, además terminan en bordes que ascienden de manera abrupta hacia las partes altas de la cordillera, debido al microclima que generan son aprovechados por poblaciones para el asiento de sus zonas de cultivo y pueblos, están directamente relacionadas con la disolución de rocas carbonatadas pues están ubicadas en el centro de fondos de valles ciegos.

### **Lomadas (8° a 20°)**

Las lomadas o colinas, se definen como elevaciones que no deben sobrepasar los 150 a 200 metros, con geoformas de tendencia cómica, pequeñas elevaciones, homogéneas y pendientes suaves. Su rango de pendientes está entre 8° y 20°, y sirven parcialmente como terrenos de pastoreo, agricultura y ganadería.

Constituye aproximadamente el 65% del área de estudio y se distribuyen por toda el área del proyecto. Se encuentran bordeando valles, planicies. La configuración de lomas depende de la litología se asocia a la Formación Inca especialmente por su baja resistencia a la erosión.

### **Laderas (20° a 50°)**

Son geoformas inclinadas de una cadena montañosa según Dávila (2011), estas unidades representan aproximadamente un 10 % del área de estudio siendo una unidad geomorfológica generadora de inestabilidad y se encuentran cubriendo estratos del Grupo Pulluicana que en algunos sectores se encuentran con un alto grado de fracturamiento y meteorización. Sus características dependen de la historia geológica y del comportamiento tectónico del mesozoico y cenozoico, relacionado con la conformación de la deflexión de Cajamarca.

### **Escarpas (50° a más)**

Dávila (2011) lo define como fuerte desnivel en los terrenos que delimita a dos superficies más o menos planas. En nuestra investigación este tipo de pendientes se encontraron en las Formaciones Cajamarca a la altura de la zona crítica 3 en Brasilmayo.

## Valles

El más representativo del ámbito del proyecto, se ubica en el río Limón abarcando desde el anexo de Gelij hasta el anexo de Shucamayo, también se presenta el valle del río Marañón entre otros valles menores.



Foto 4.7 Valle del río Marañón

## Ríos

Dentro de esta unidad se encuentran los diversos ríos afluentes del río Marañón, los ríos son los principales agentes modeladores de las geoformas de la zona de estudio se encuentra en la etapa juvenil de acuerdo a su perfil transversal.

Cuadro 4.2 Unidades Morfogénicas del área de investigación

TIPO DE RELIEVE	GEOMETRIA	LITOLOGÍA	ORIGEN	EDAD DE LA LITOLOGIA		
UNIDAD MORFOGENETICA (UM)	PENDIENTE	ASOCIADA A SU COMPOSICIÓN	ASOCIADO AL EVENTO O AL PROCESO GEOLÓGICO	PERIODO	EPOCA	EDAD
Planicies	0° - 8°	Deoósitos al, la	Transportados	Cuaternario	Pi - Ho	Albiano
Lomas Laderas	8° - 18°	G. Pulluicana	Sedimentarios	Cretácico	Superior	Albiano
Lomas Laderas	35° - 42°	Fm. Cajamarca	Sedimentarios	Cretácico	Superior	Albiano
Lomas Laderas	32° - 40°	Fm Celendín	Sedimentarios	Cretácico	Superior	Albiano
Escarpas	50° - 75°	Fm. Chota	Sedimentarios	Paleógeno	Paleoceno	Albiano

## 4.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Los diversos relieves que configuran la cuenca del Marañón han sido moldeados y desarrollados por los diversos procesos geoestructurales (tectónicos) y/o por los procesos exógenos, como la erosión y el intemperismo. En el precámbrico inicia el plegamiento del complejo Marañón, con un metamorfismo regional de bajo grado; posteriormente empieza la tectónica compresiva, generando fallas de carácter regional y local, que han afectado las secuencias Paleozoicas y Cenozoicas, delimitando bloques levantados y hundidos. Las fallas más comunes son del tipo inversas, de cabalgamiento. Las fallas presentan sistemas de orientación N-S.

### 4.4.1 Fallas

Observar tipo de fallas inversas, debido a que los estratos más antiguos están sobre los más recientes, las fallas obedecen la dirección de los plegamientos.

#### 4.4.2 Diaclasas

Las rocas contienen familias de diaclasas formadas en respuesta a la fatiga producida por los esfuerzos tectónicos, algunas diaclasas indican la presencia de fallas.



Foto 4.8 Diaclasas pertenecientes a afloramientos de la Formación Pulluicana

### 4.5 GEOTECNIA

#### 4.5.1 Zona Crítica 01: Km 112+700 – Km114+100

##### A. Descripción de los Taludes

Los taludes de la carretera están emplazados en rocas calizas fracturadas y meteorizadas, con espesores promedio de 30 centímetros, intercalado con capas de arcillitas con espesores menores a 5 centímetros, y pertenecen al Grupo Pulluicana. La estratificación tiene una inclinación cercana a 40° y está en contra del talud, lo cual determina que existe estabilidad. El talud presenta una zona superior altamente meteorizada, con una coloración blanquecina producto de la descarbonatación de la caliza, representando la parte peligrosa a caídas en bloques o pequeñas rocas.



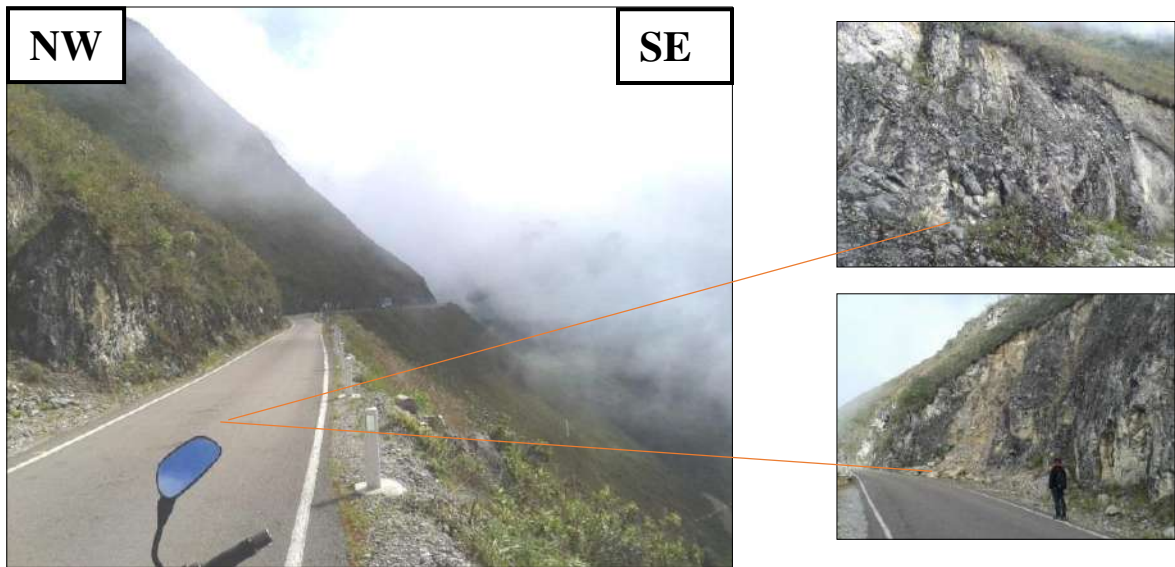


Foto 4.9 Presencia de calizas meteorizadas del km. 112+700 al km 114+100

## B. Análisis Estructural con Dips

Cuadro 4.3. Dip y DD de las discontinuidades de la zona crítica1.

TIPO	D	DD
TALUD	77	75
ESTRATO	25	350
FAMILIA DE DISCONTINUIDAD 1	80	12
FAMILIA DE DISCONTINUIDAD 2	80	110
FAMILIA DE DISCONTINUIDAD 3	40	75

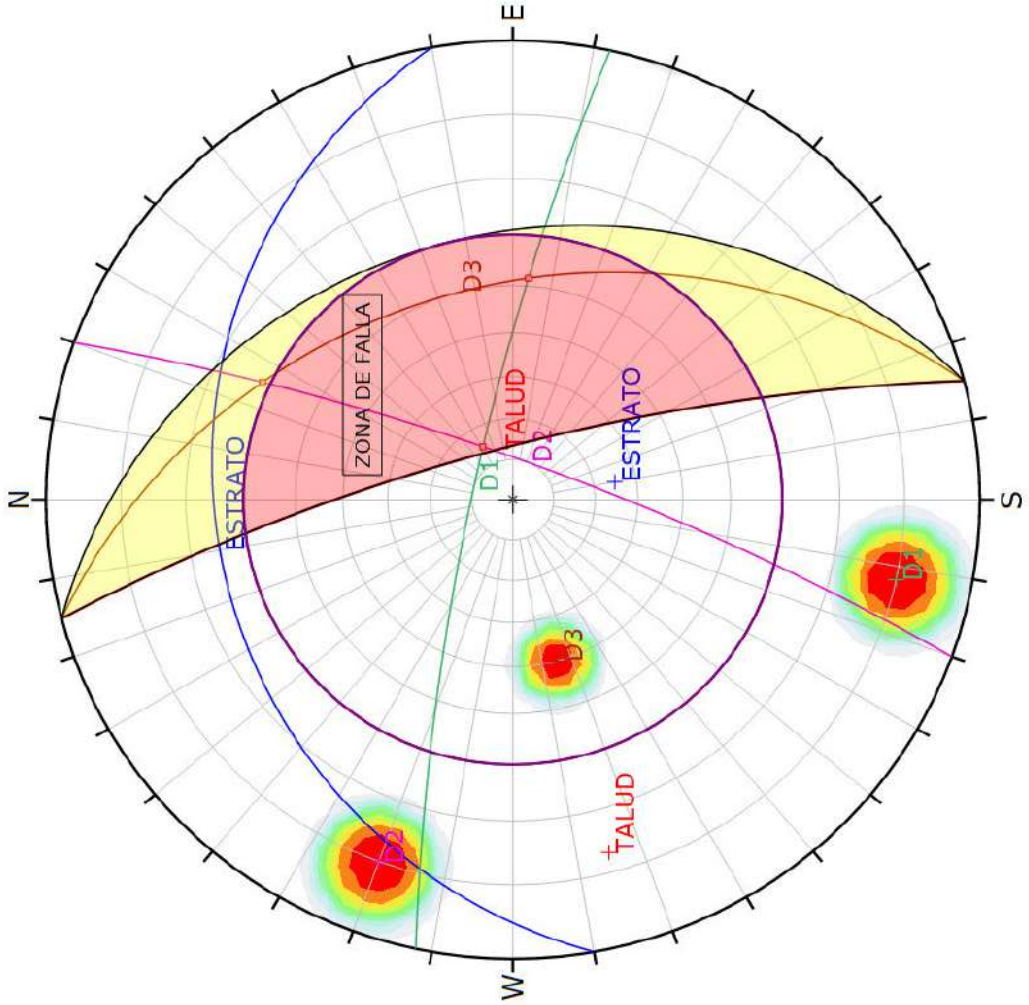
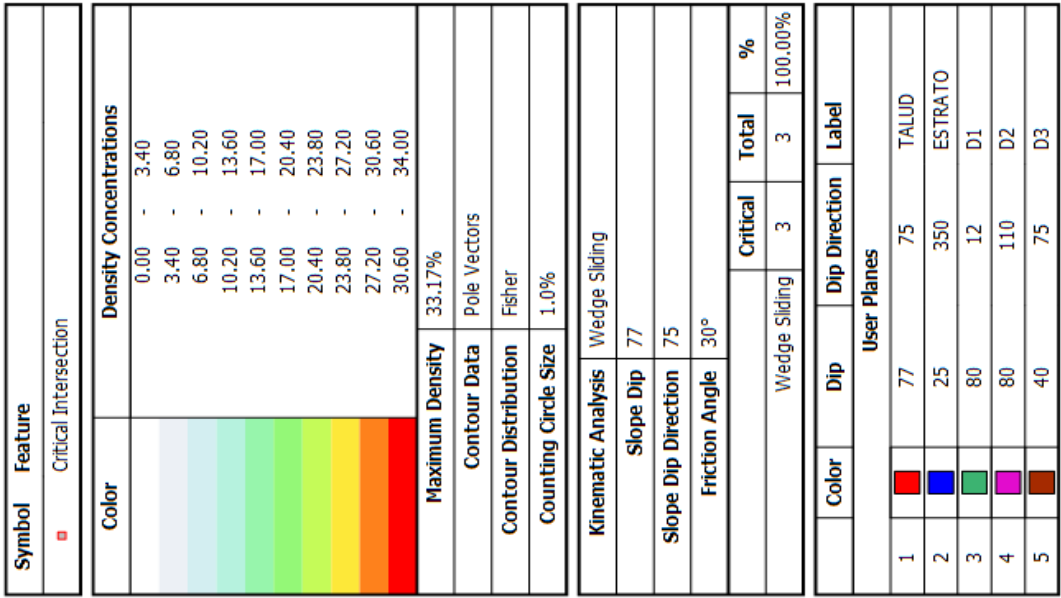


Figura 4.2 Análisis con Dips Planar y Cuña, zona critica 1.

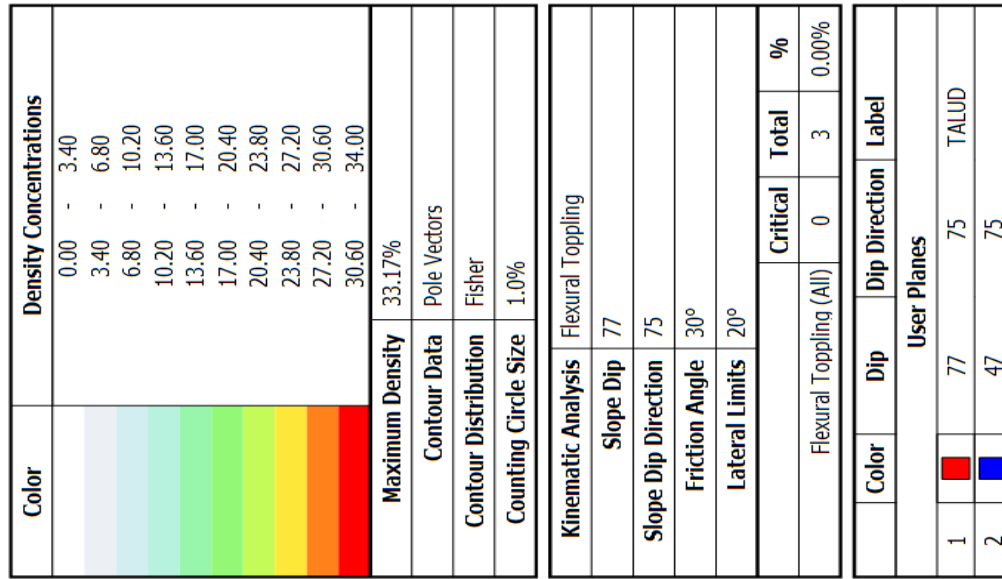


Figura 4.3 Análisis con Dips – Vuelco, zona crítica 1.

El análisis con el Software Dips determino que la familia de discontinuidades 3 (D3) se comporta en condición crítica. Evidencia tipo de falla en cuña, poca probabilidad de falla planar.

### C. Caracterización RMR del Macizo Rocoso

La Clasificación Geomecánica según Bieniawski 1989 es como se muestra en el cuadro adjunto.

Cuadro 4.4 Valoración RMR, zona crítica 1

1	Resistencia a la compresión uniaxial	4	
2	RQD	8	
3	Separación entre diaclasas	10	
4	Estado de las discontinuidades	Persistencia	4
		Apertura	3
		Rugosidad	5
		Relleno	2
		Alteración	3
5	Condición hidrogeológica	15	
6	Corrección para taludes	-15	
	Total	<b>39</b>	

Con la valoración se obtuvo que la roca tiene un RMR 21 a 40, lo cual significa que la roca es clase IV, calidad mala.

### D. Análisis con el Slide

Se ha recreado las medidas del talud y su entorno, además el análisis ha tomado en cuenta un solo tipo de material, calizas blanquecinas debido a la descarbonatación, con un peso específico de 24.5 KN/m<sup>3</sup>. Se ha considerado el criterio de Hoek y Brown generalizado (2002), con una compresión uniaxial igual a 40 Mpa este valor está diseñado según el programa informático para rocas que no pueden ser rayados por un cuchillo, pero pueden ser fracturadas por un golpe de martillo de geólogo. GSI de 35, y una constante de roca intacta  $m_i$  igual a 9, y un factor de voladura 1. Se ha considerado un nivel freático de agua subterránea.

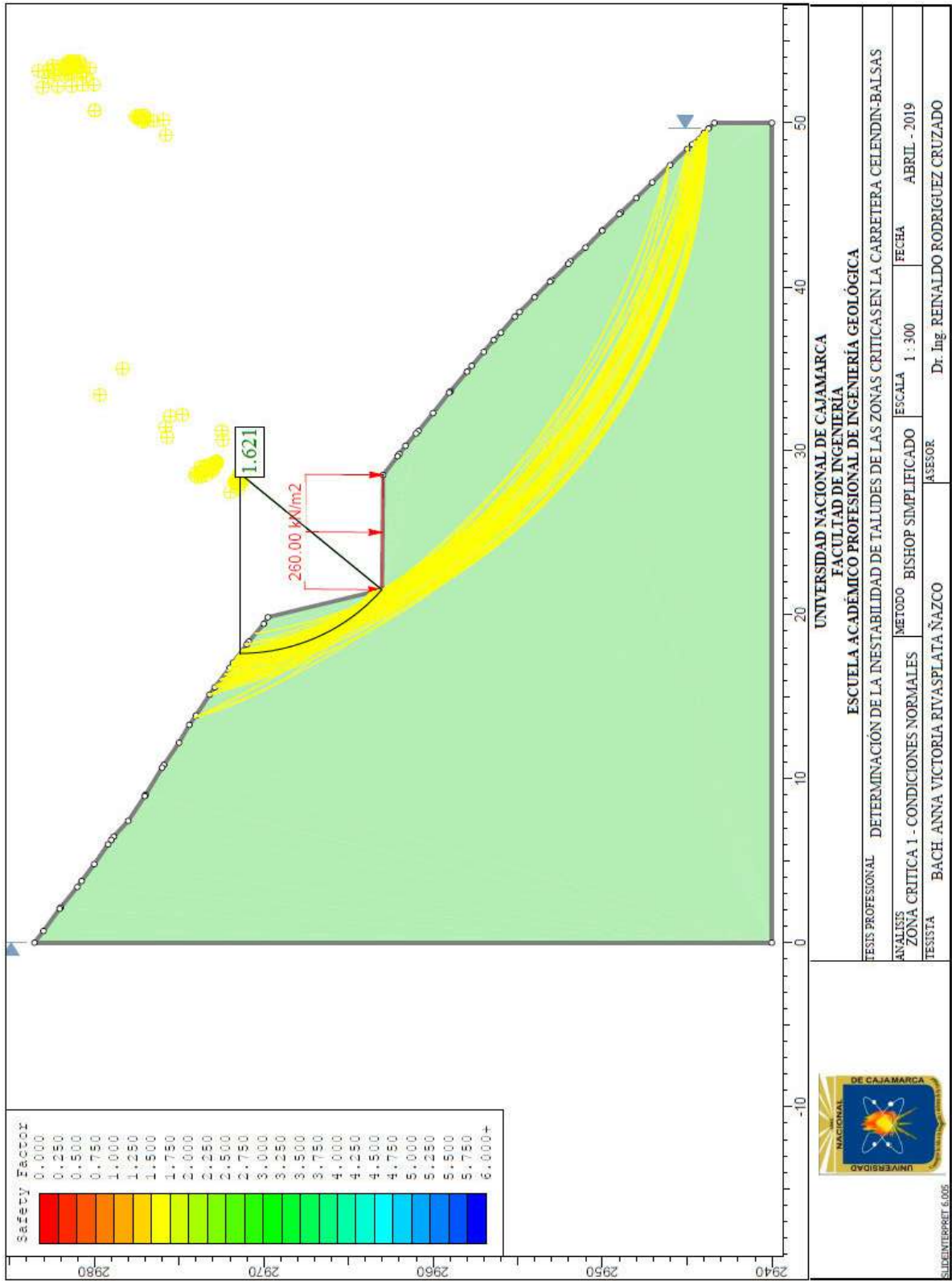


Figura 4.4 Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Bishop, Zona Crítica 1

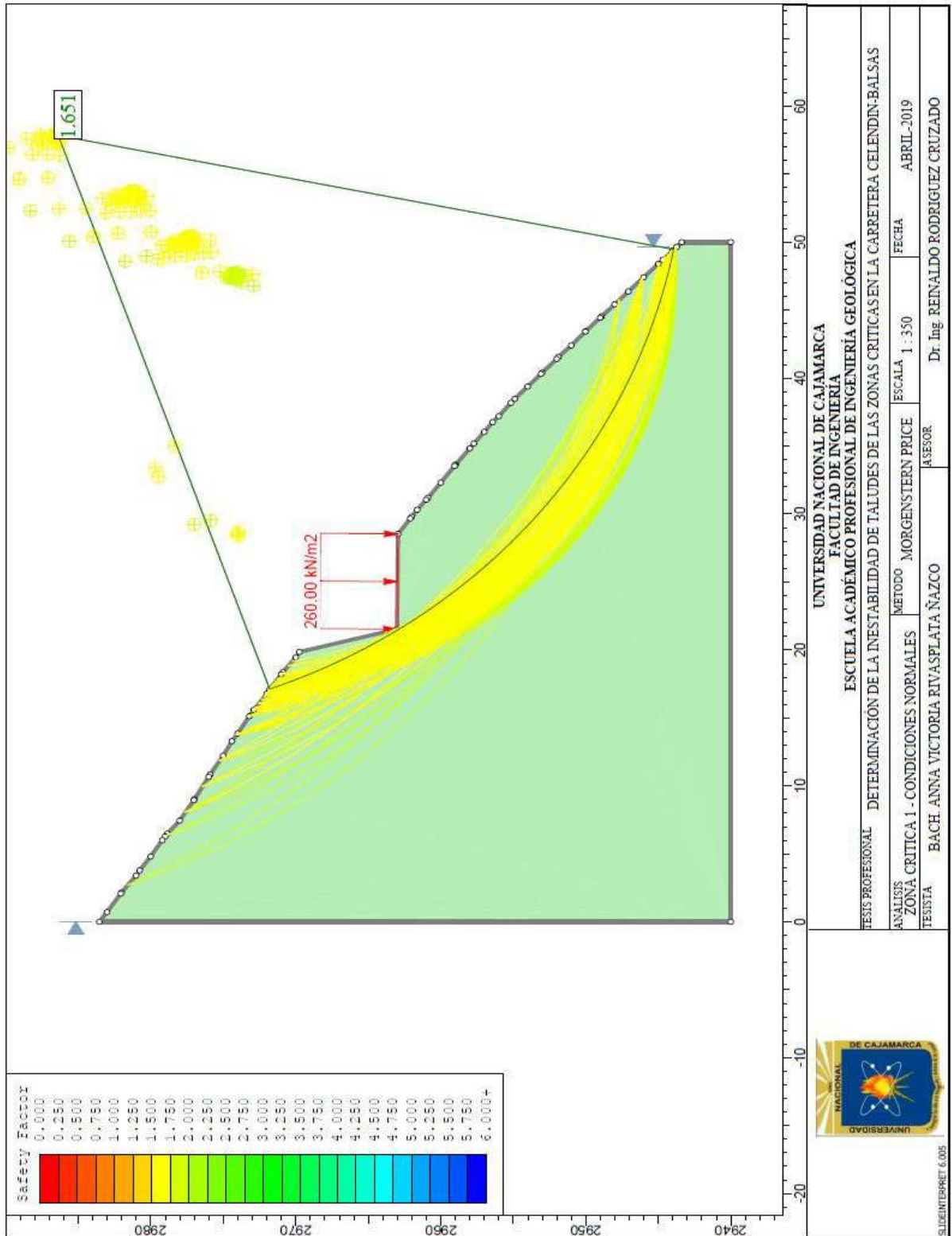


Figura 4.5 Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Morgenstern Price, Zona Crítica 1

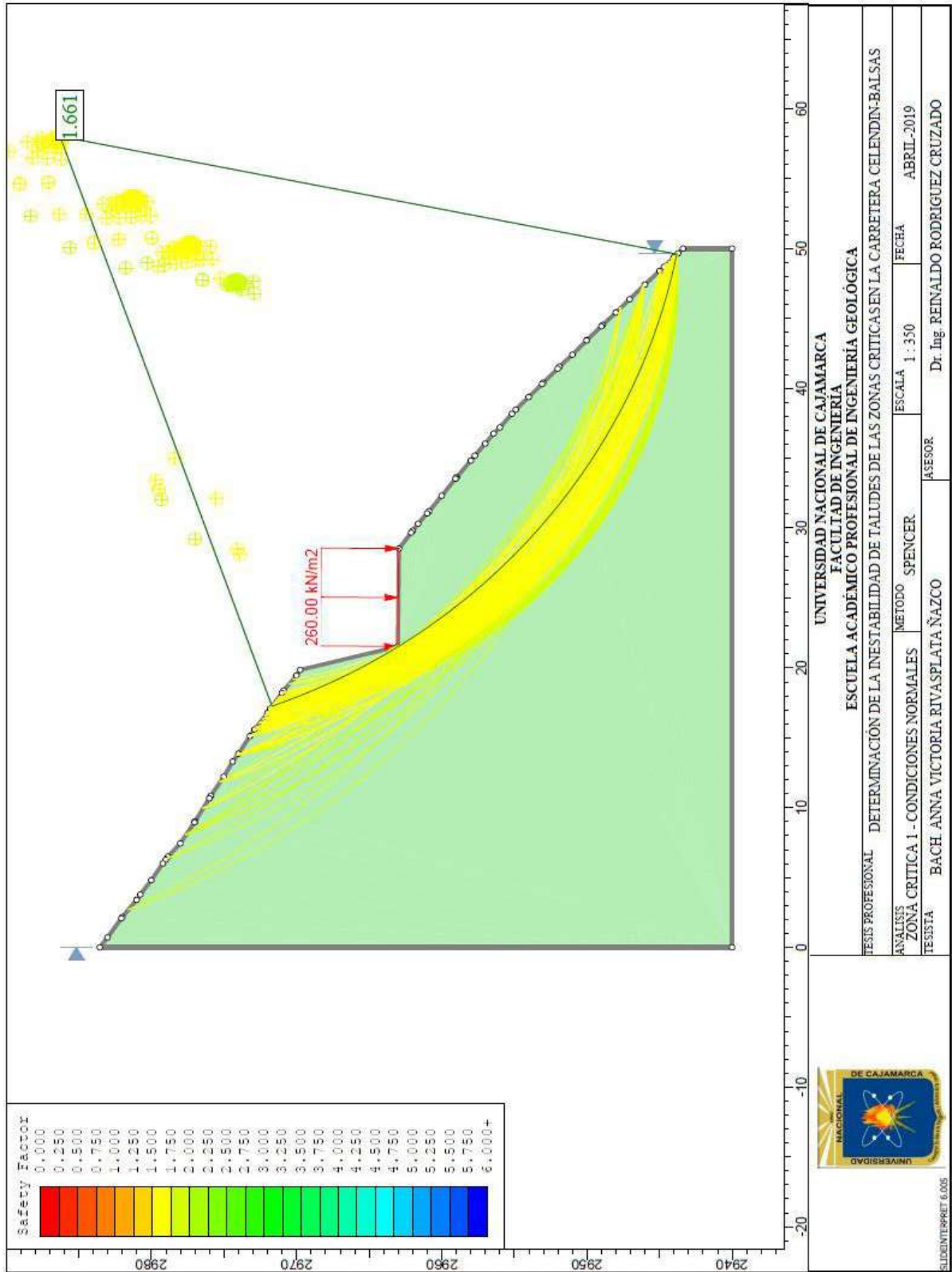


Figura 4.6 Factor de Seguridad, Condiciones Normales – Spencer, Zona Crítica 1

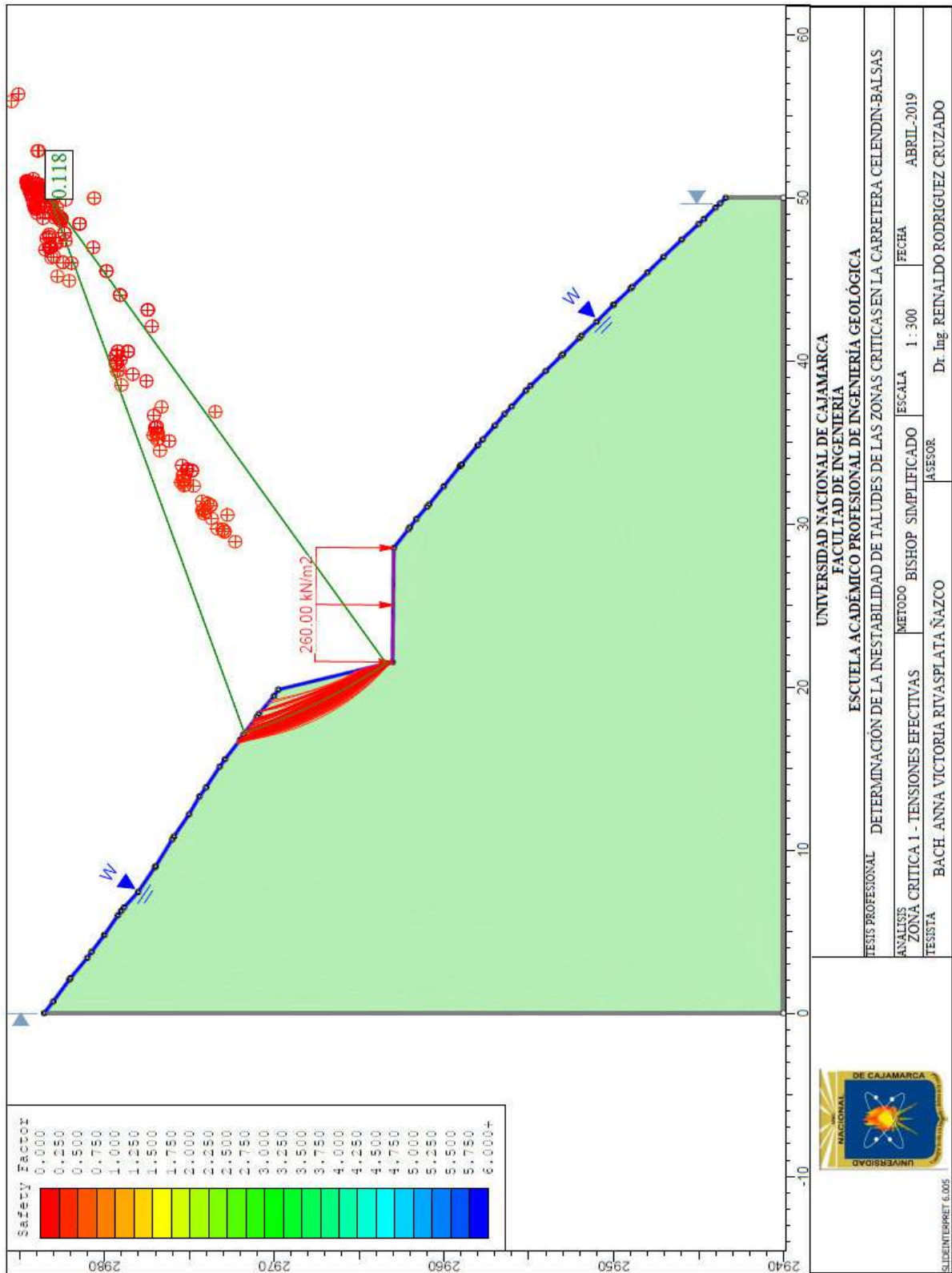


Figura 4.7 Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Bishop, Zona Crítica 1



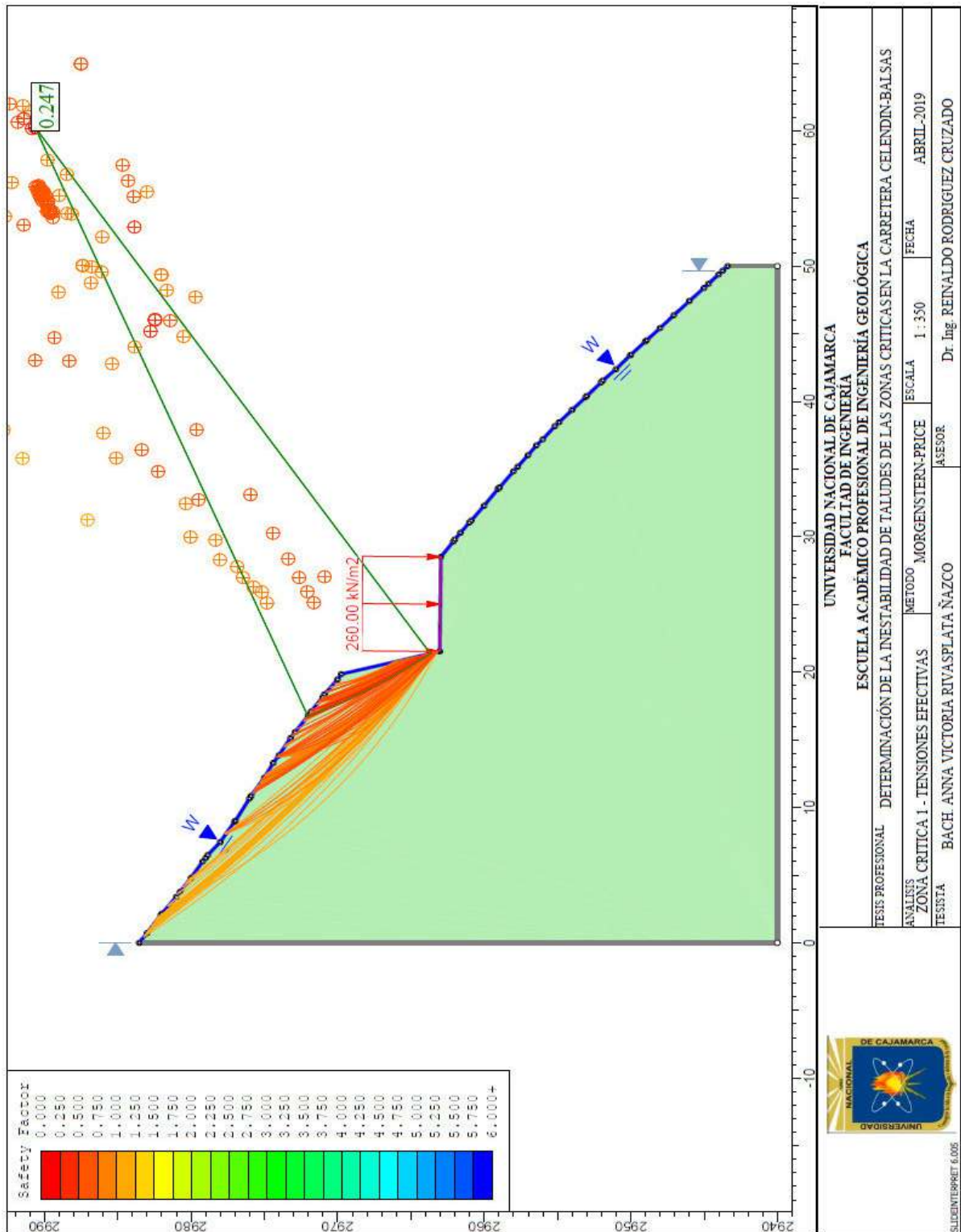


Figura 4.8 Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Morgensten - Price, Zona Crítica 1

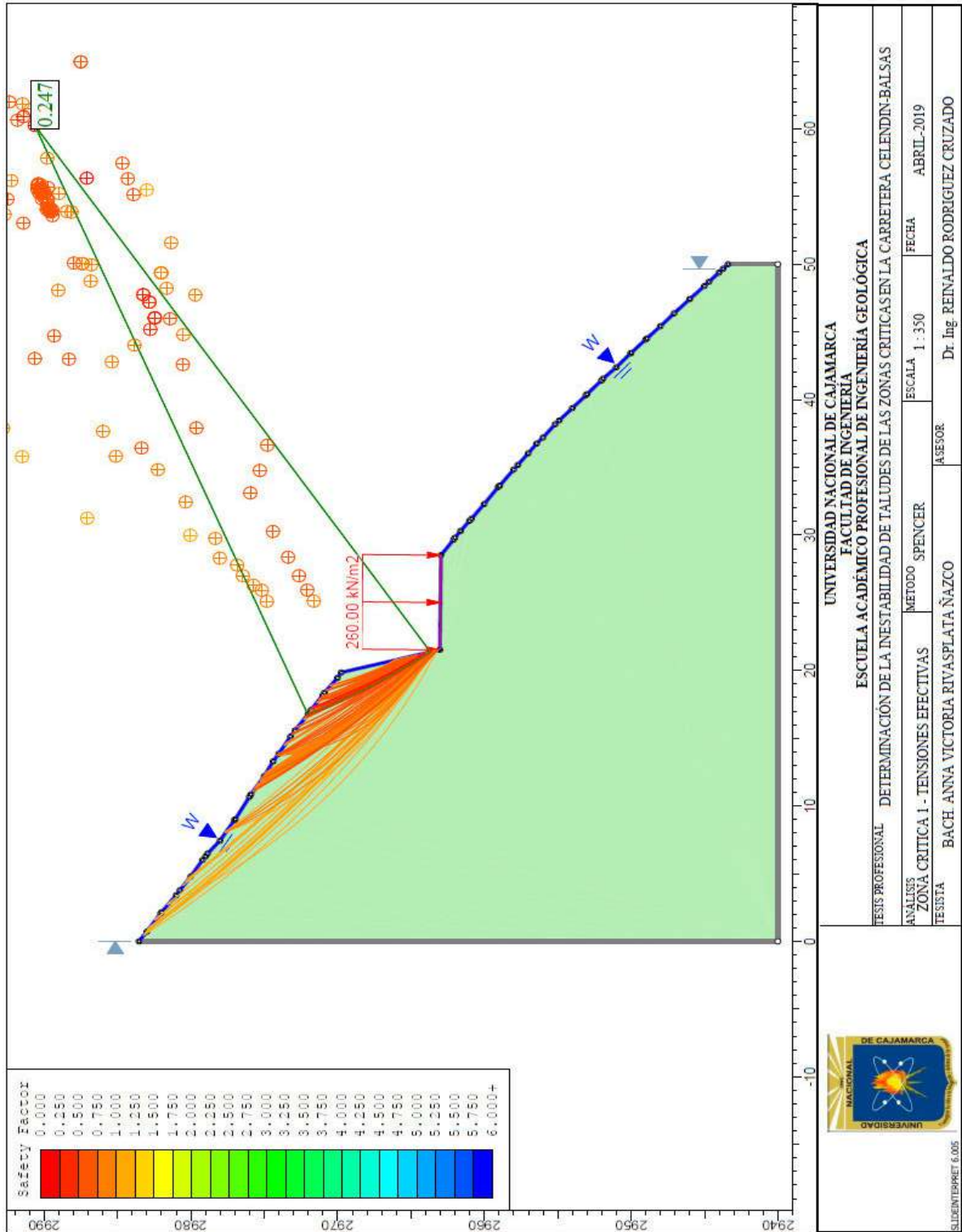


Figura 4.9 Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas – Spencer, Zona Crítica 1

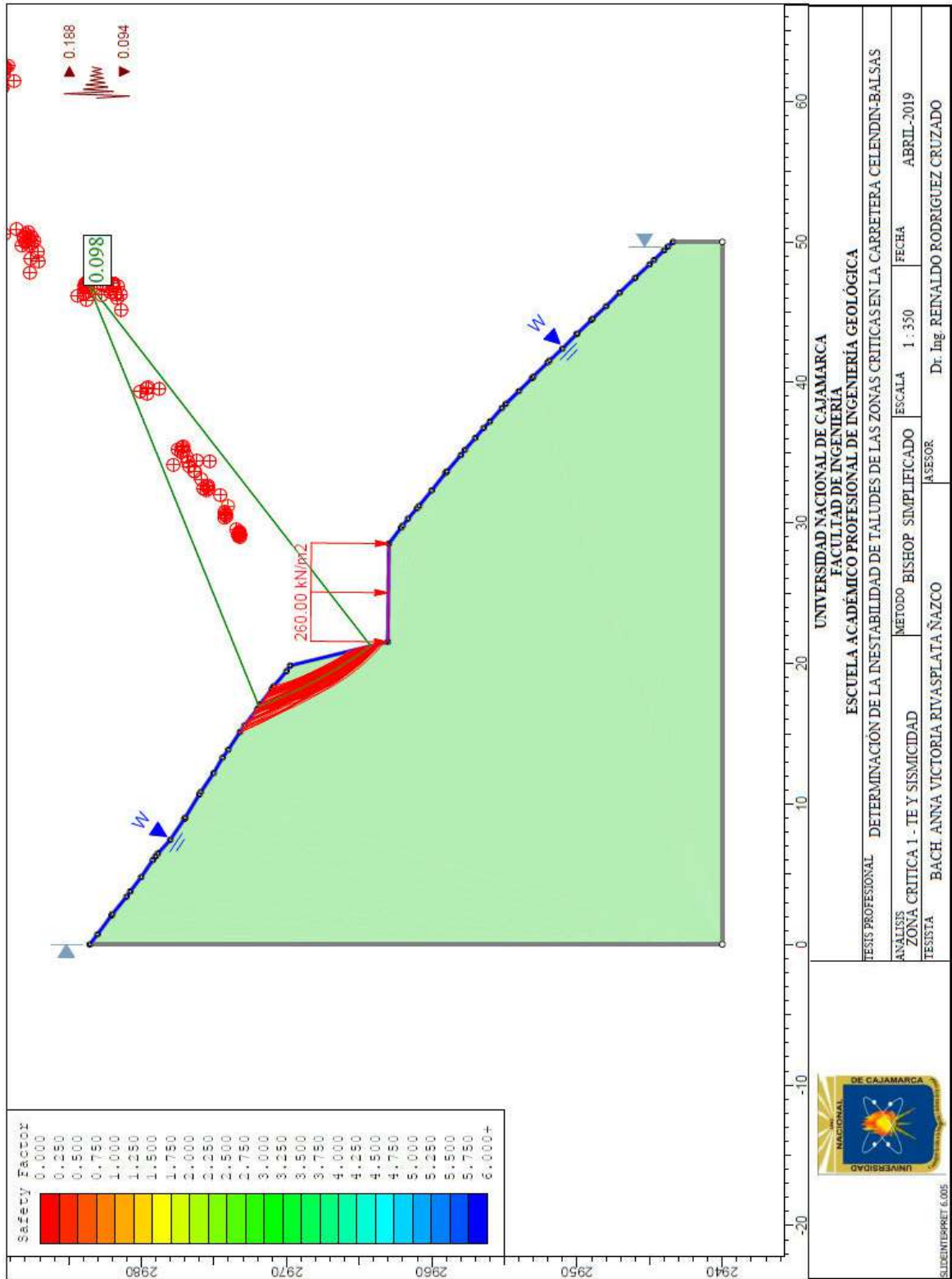


Figura 4.10 Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Bishop, Zona Crítica 1

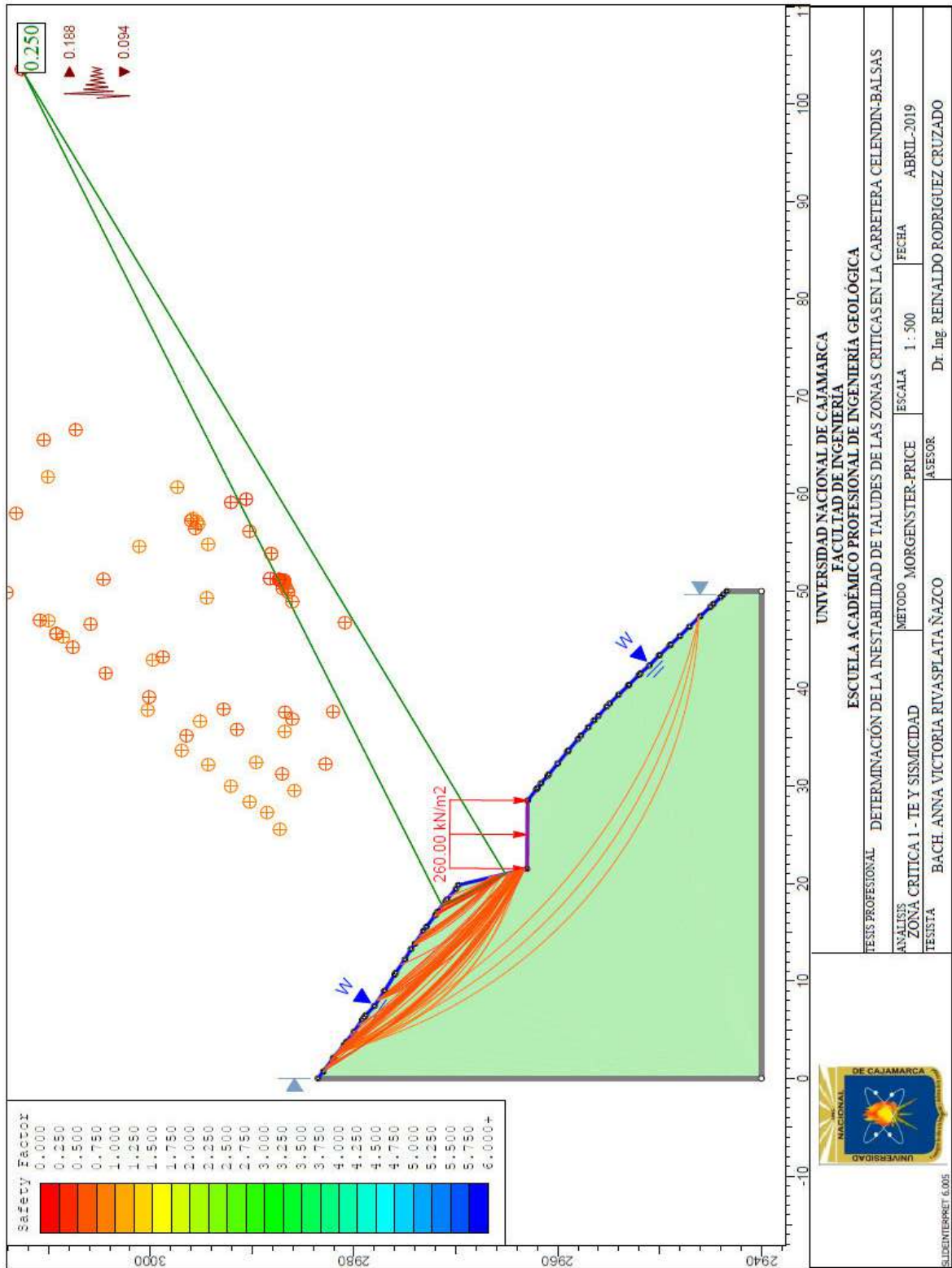


Figura 4.11 Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Morgenstern - Price, Zona Crítica 1

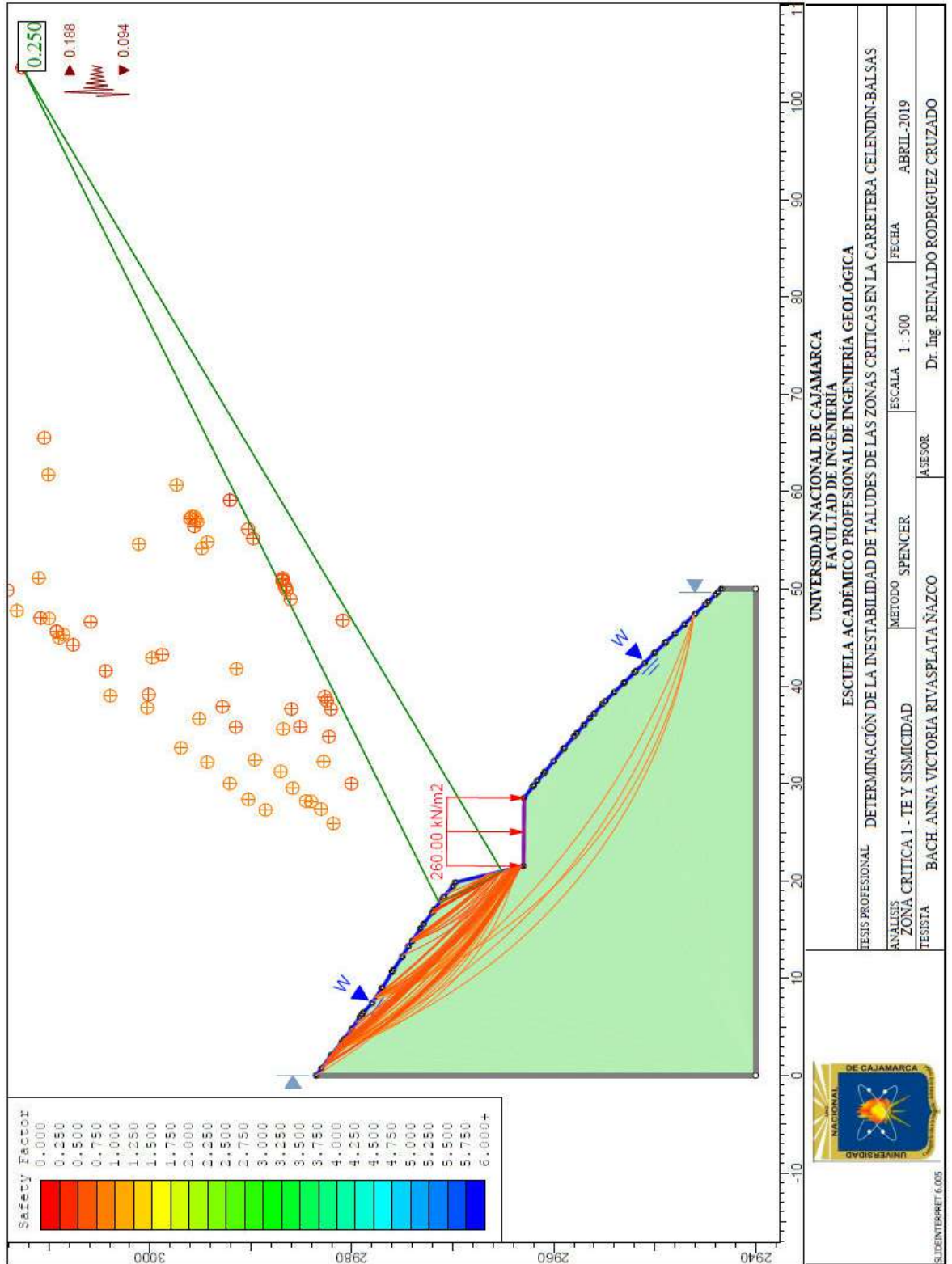


Figura 4.12 Factor de Seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad– Spencer, Zona Crítica 1

#### 4.5.2 Zona crítica 02: Km 114+900 – Km115+800

##### A. Descripción del talud

Este talud emplazado en rocas calizas presenta tres familias de discontinuidades y niveles de arcilla de 10 centímetros de espesor, presenta características de inestabilidad por el intenso fracturamiento y el ángulo del talud de 82°. Los afloramientos rocosos pertenecen al Gpo. Pulluicana.



Foto 4.10 Talud con presencia de diaclasas del km 114+900 – km115+100

##### B. Análisis estructural con Dips

Cuadro 4.5 Dip y DD de las discontinuidades, zona crítica 2

TIPO	D	DD
TALUD	82	80
ESTRATO	20	340
FAMILIA DE DISCONTINUIDADES 1	88	10
FAMILIA DE DISCONTINUIDADES 2	84	100
FAMILIA DE DISCONTINUIDADES 3	38	70

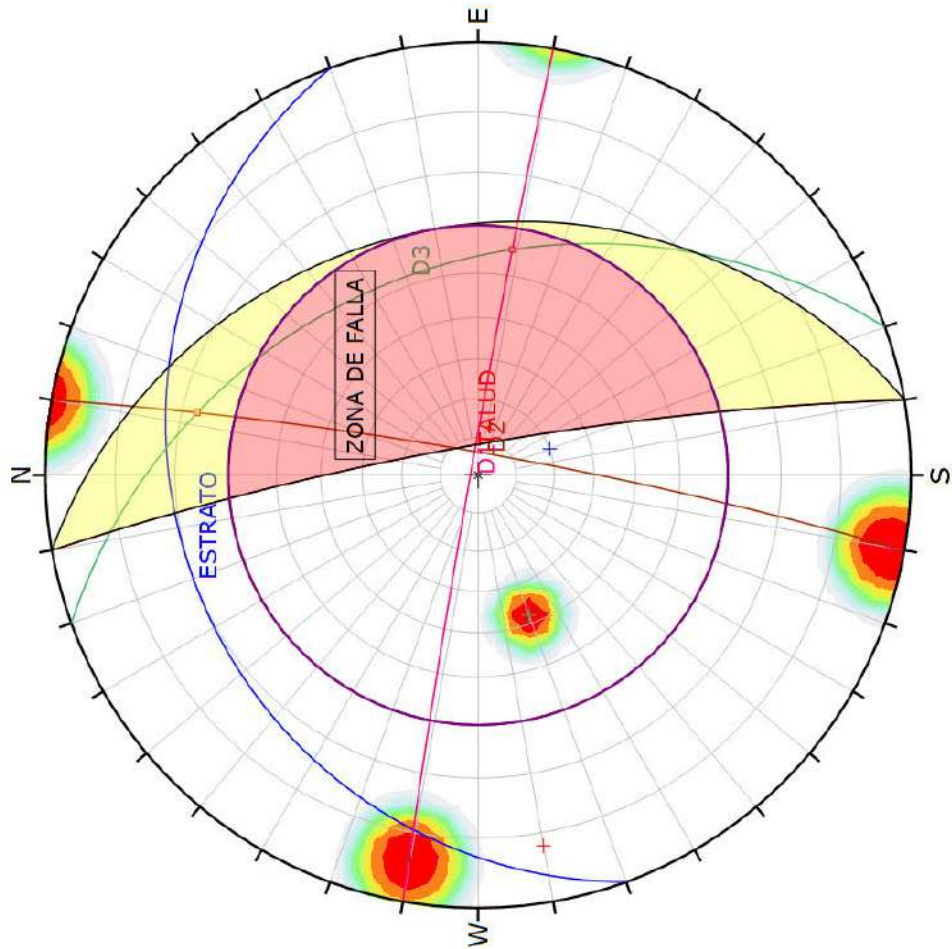
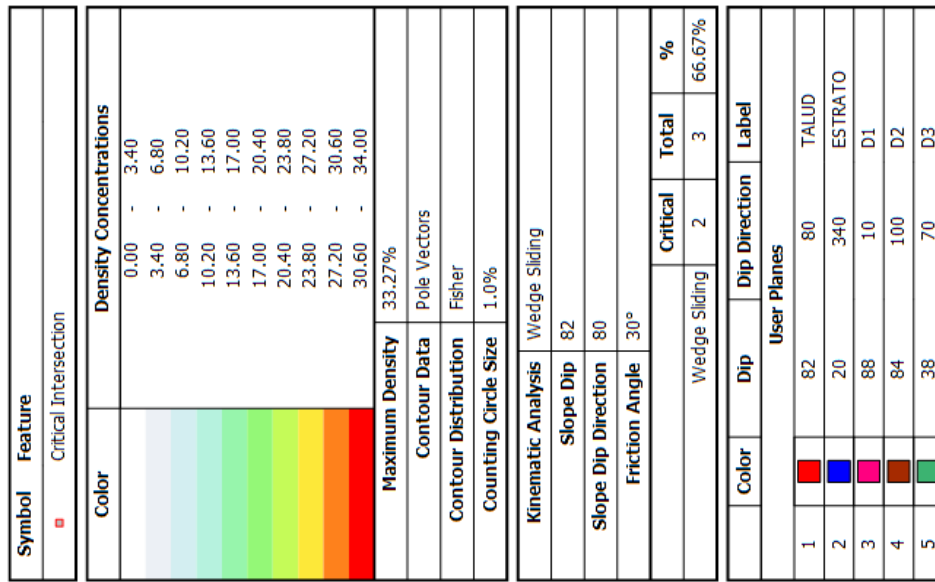


Figura 4.13 Análisis con Dips, Planar y Cuña, Zona Crítica 2

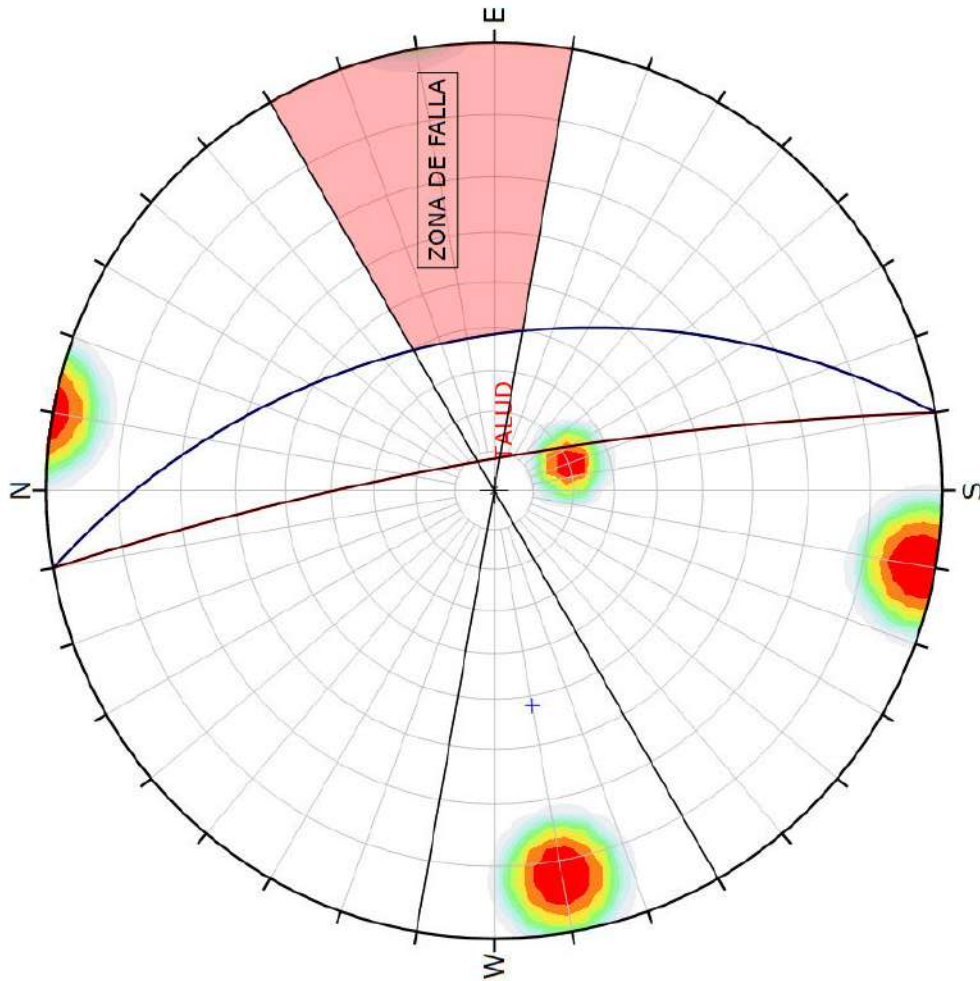
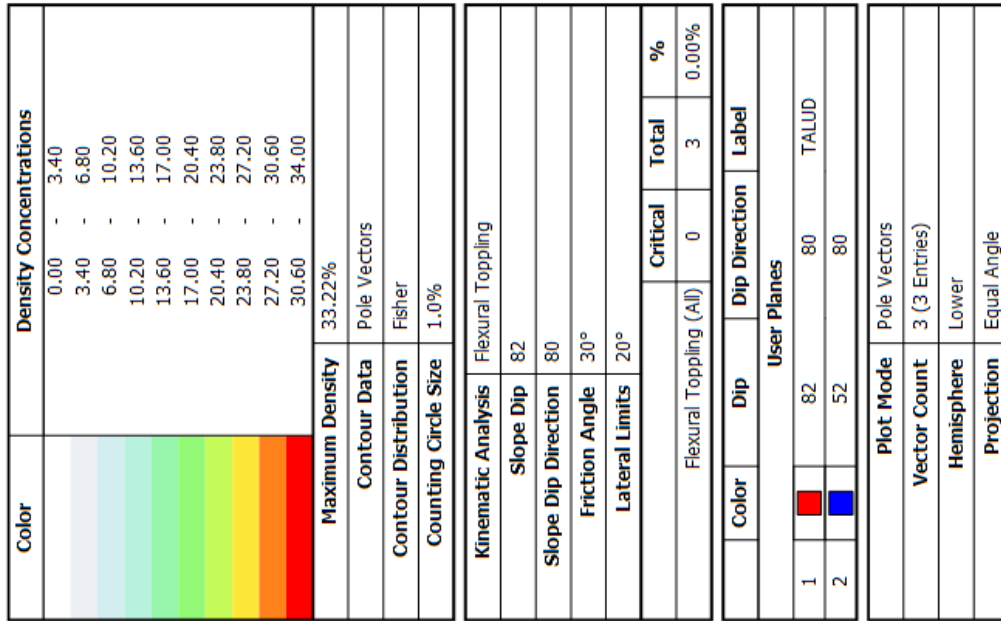


Figura 4.14 Análisis con Dips, Vuelco Zona Crítica 2



El análisis con el Software Dips permite identificar a la discontinuidad 3 (D3), como la crítica. Evidencia tipo de falla en cuña, poca probabilidad de falla planar.

### C. Caracterización RMR del macizo rocoso

Clasificación Geomecánica Bieniawski 1989 (puntajes)

Cuadro 4.6 Valoración RMR, zona crítica 2

1	Resistencia a la compresión uniaxial		7
2	RQD		13
3	Separación entre diaclasas		10
4	Estado de las discontinuidades	Persistencia	4
		Apertura	1
		Rugosidad	5
		Relleno	2
		Alteración	3
5	Condición hidrogeológica		15
6	Corrección para taludes		-15
	Total		45

Según la clasificación geomecánica RmR (Bieniawski, 1989) se obtiene una roca de clase III, calidad media.

### D. Análisis con el Slide

El análisis ha tomado en cuenta un solo tipo de material calizas, con un peso específico de 24.5 KN/m<sup>3</sup>. Se ha considerado el criterio de Hoek y Brown generalizado para rocas, con una compresión uniaxial de 50 Mpa, con un GSI de 50, y una constante de roca intacta mi igual a 9, y un factor de voladura 1. No se ha considerado nivel freático de agua subterránea.

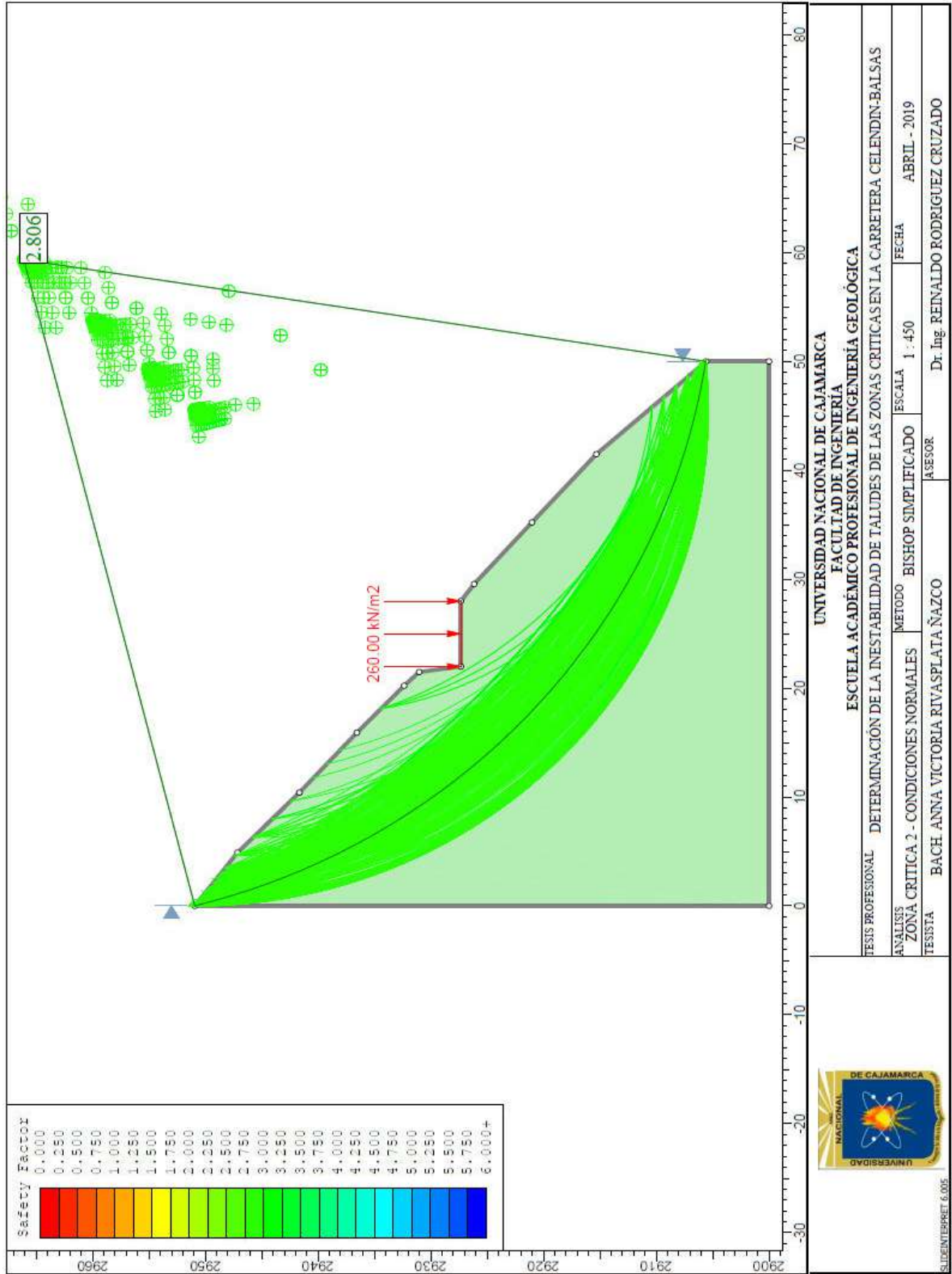


Figura 4.15 Factor de seguridad, Condiciones Naturales – Bishop, Zona Crítica 2

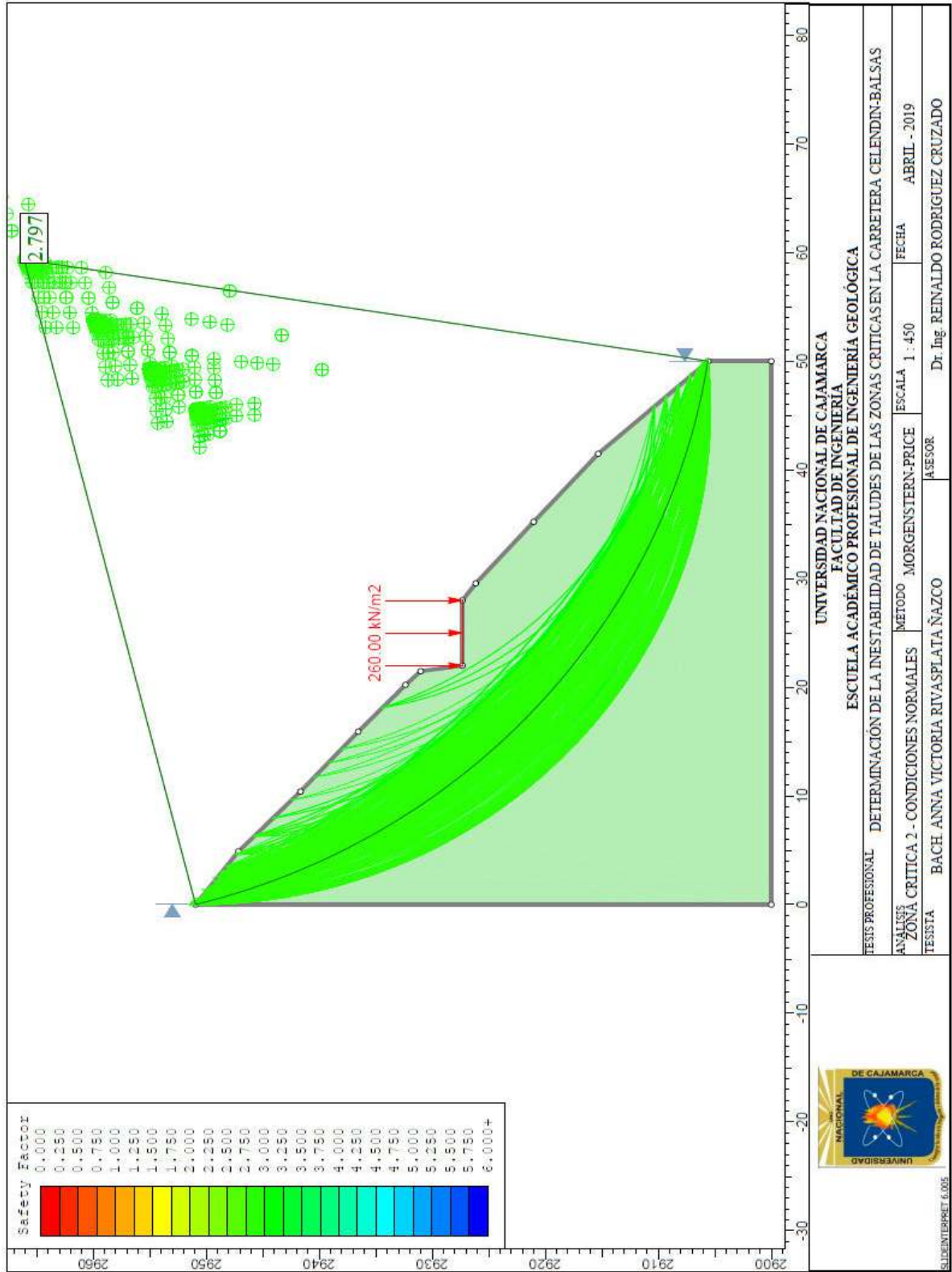


Figura 4.16 Factor de seguridad, Condiciones Naturales – Morgenster - Price, Zona Crítica 2

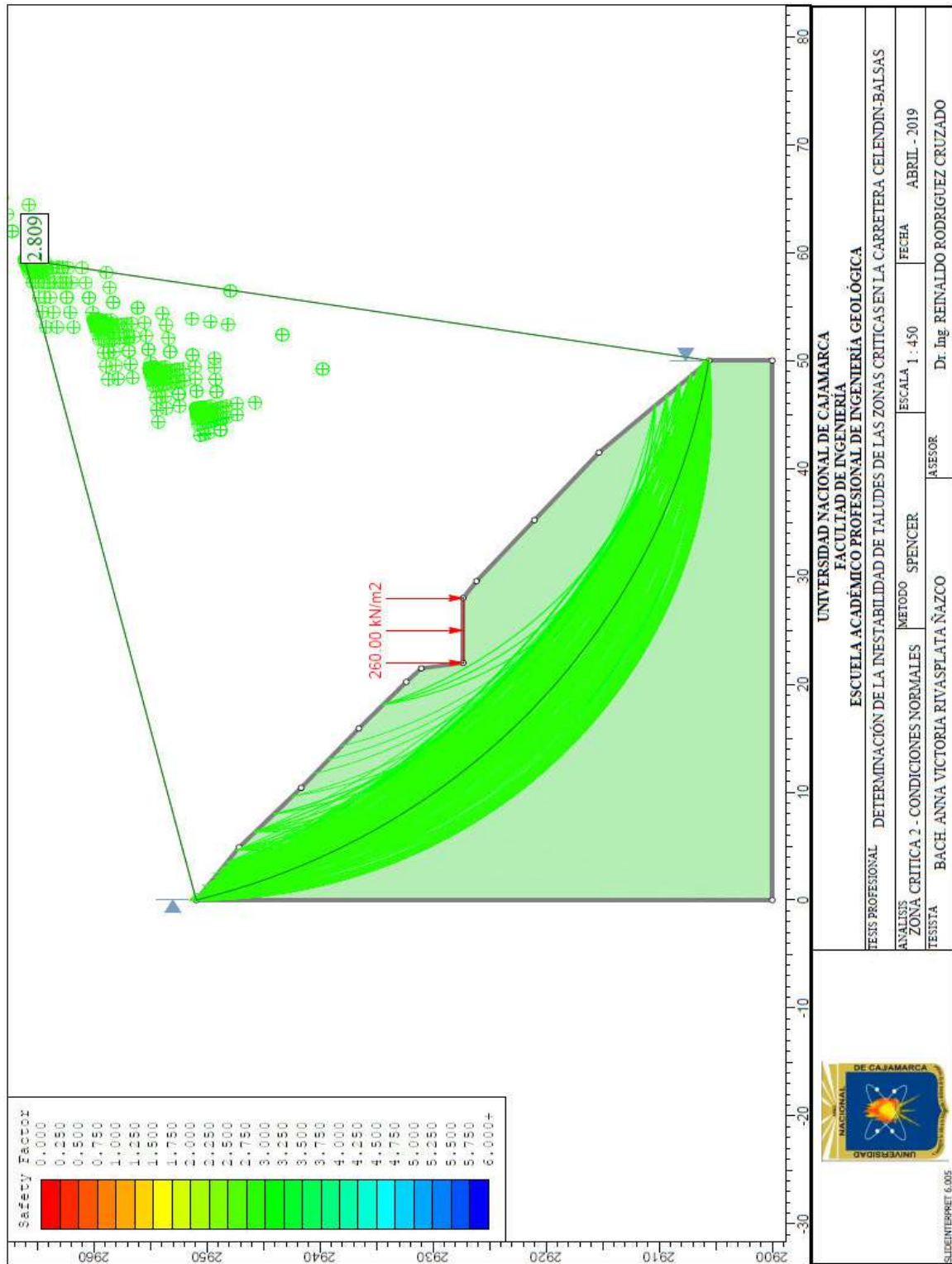


Figura 4.17 Factor de seguridad, Condiciones Normales – Spencer, Zona Crítica 2

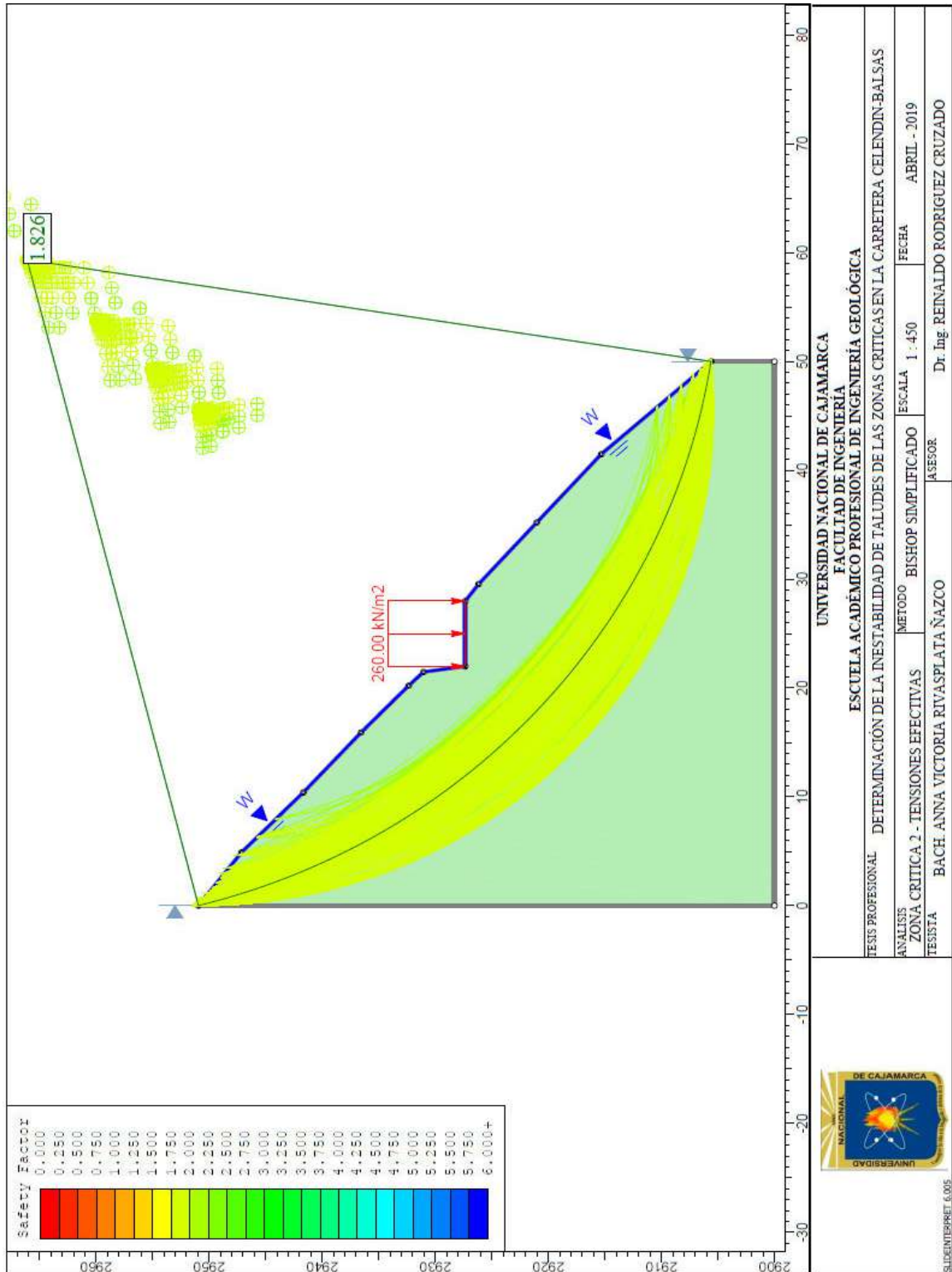


Figura 4.18 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas – Bishop, Zona Crítica 2

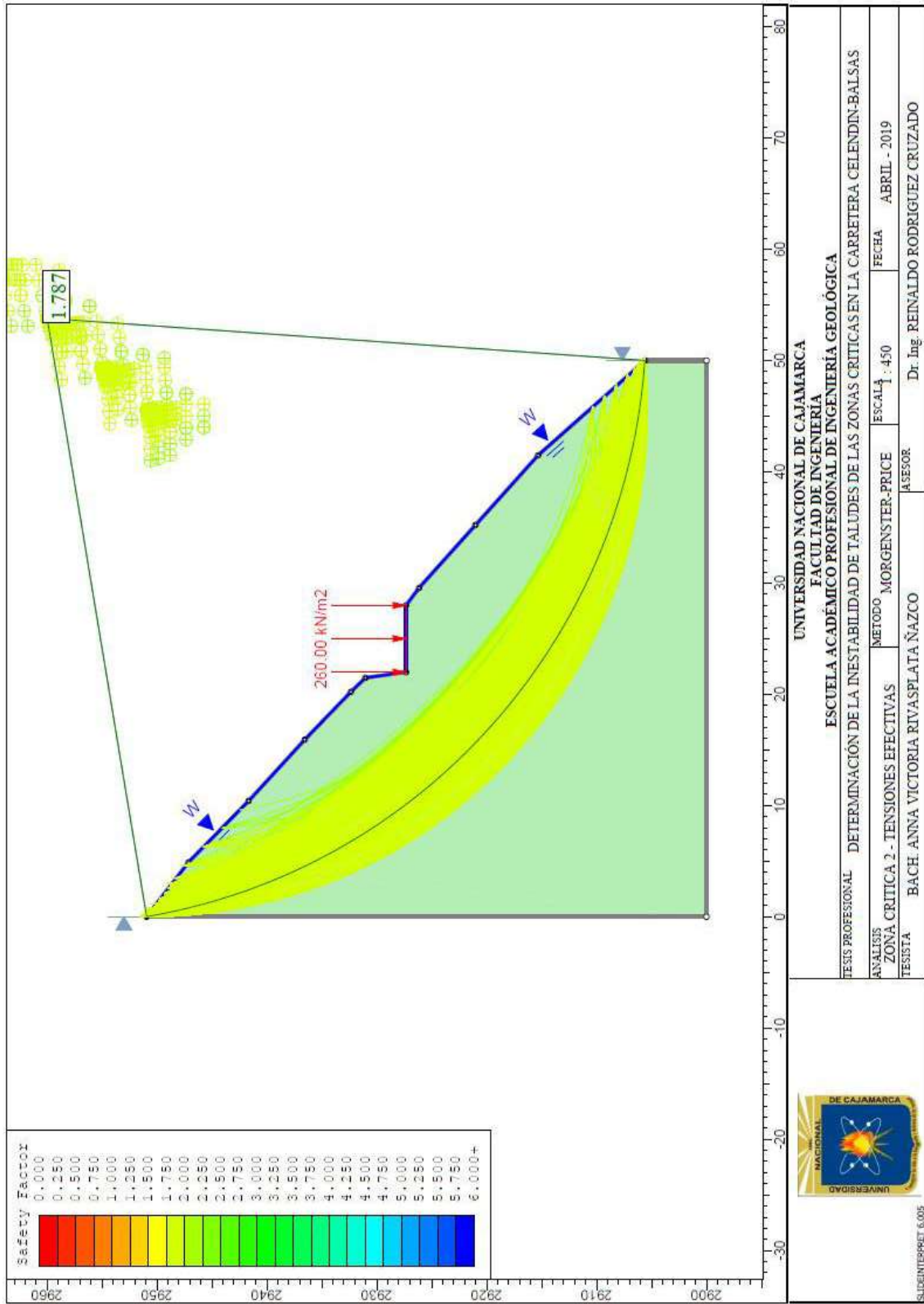


Figura 4.19 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas – Morgenster - Price, Zona Crítica 2

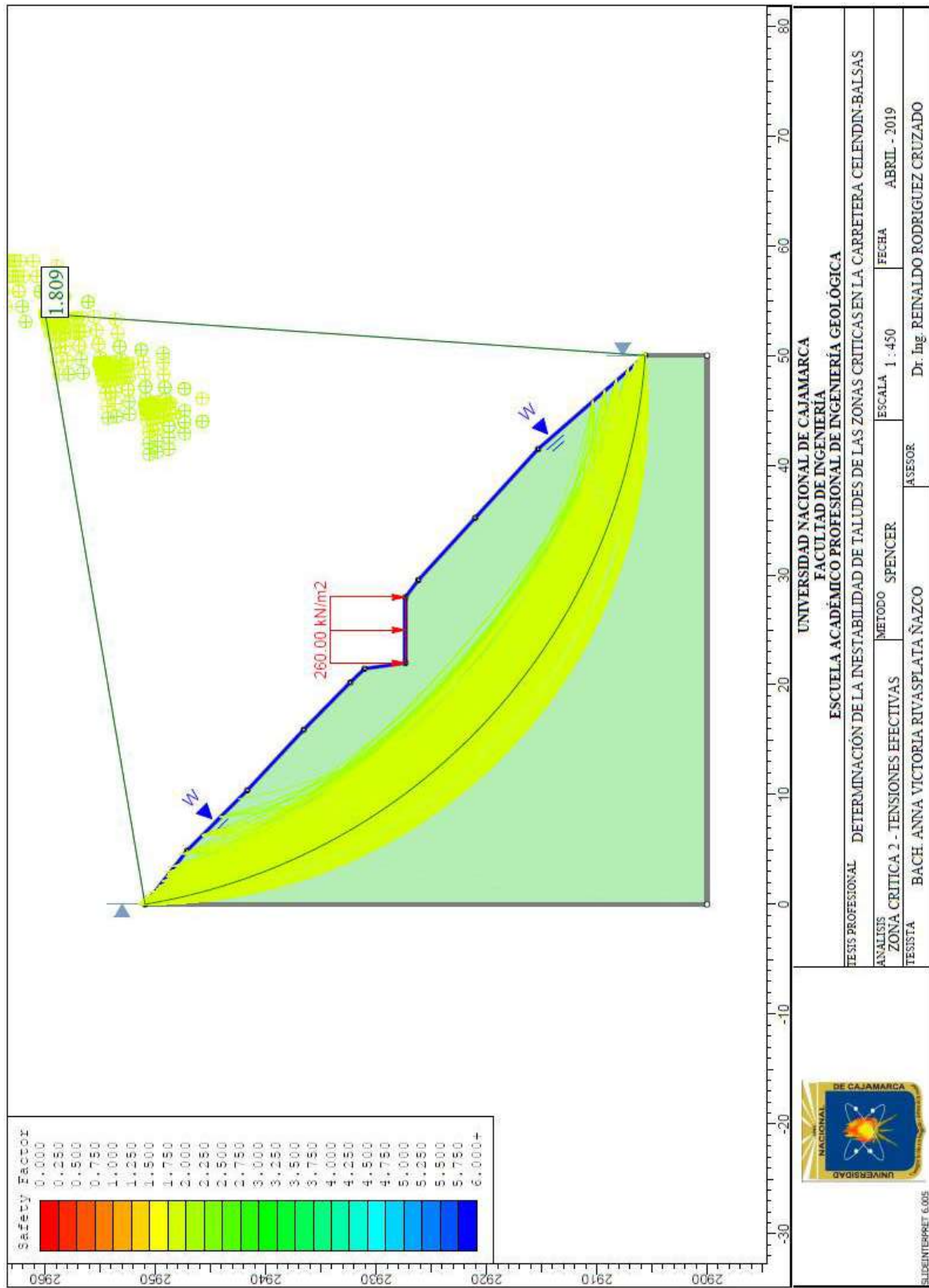


Figura 4.20 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas – Spencer, Zona Crítica 2

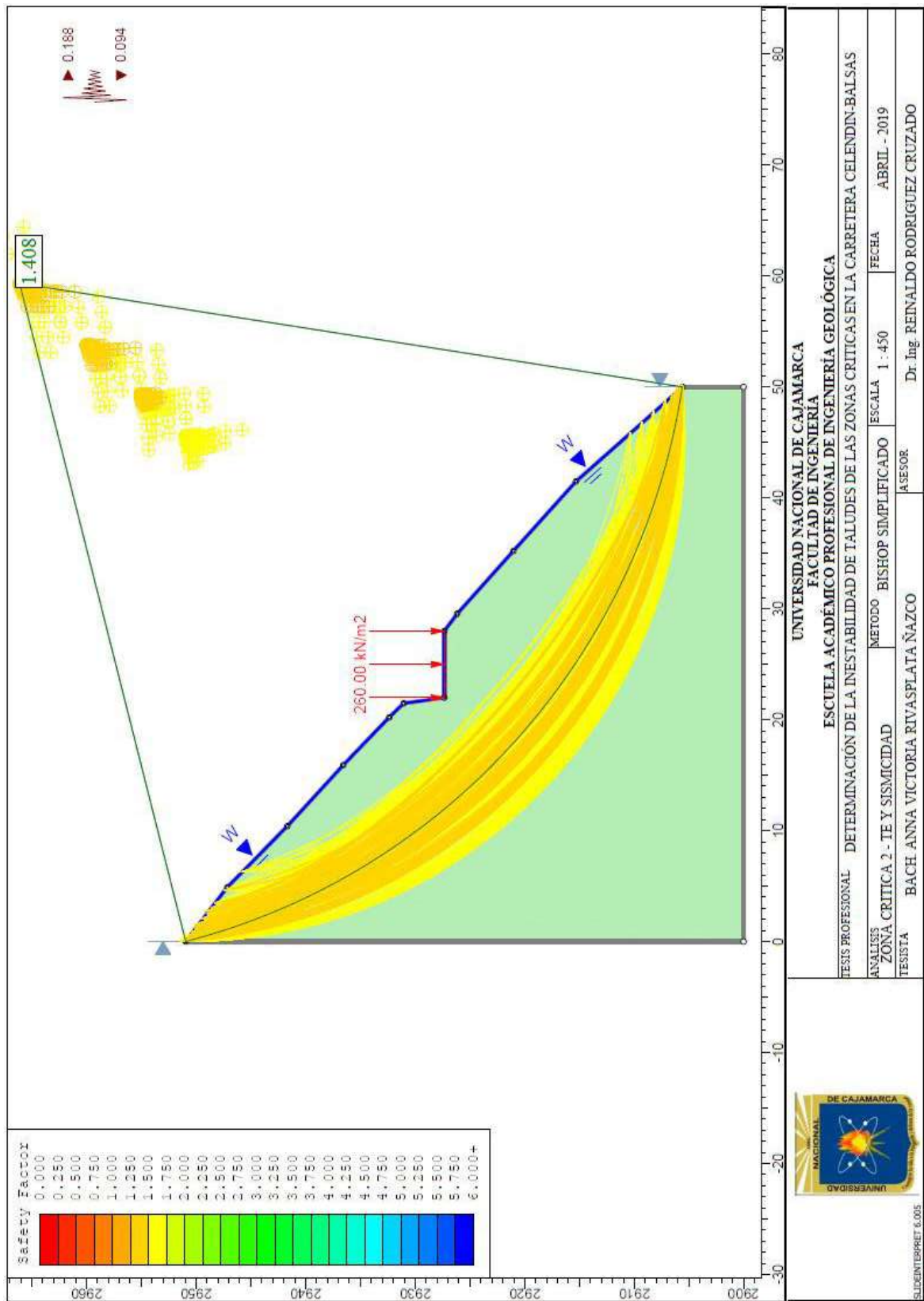


Figura 4.21 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad – Bishop, Zona Crítica 2



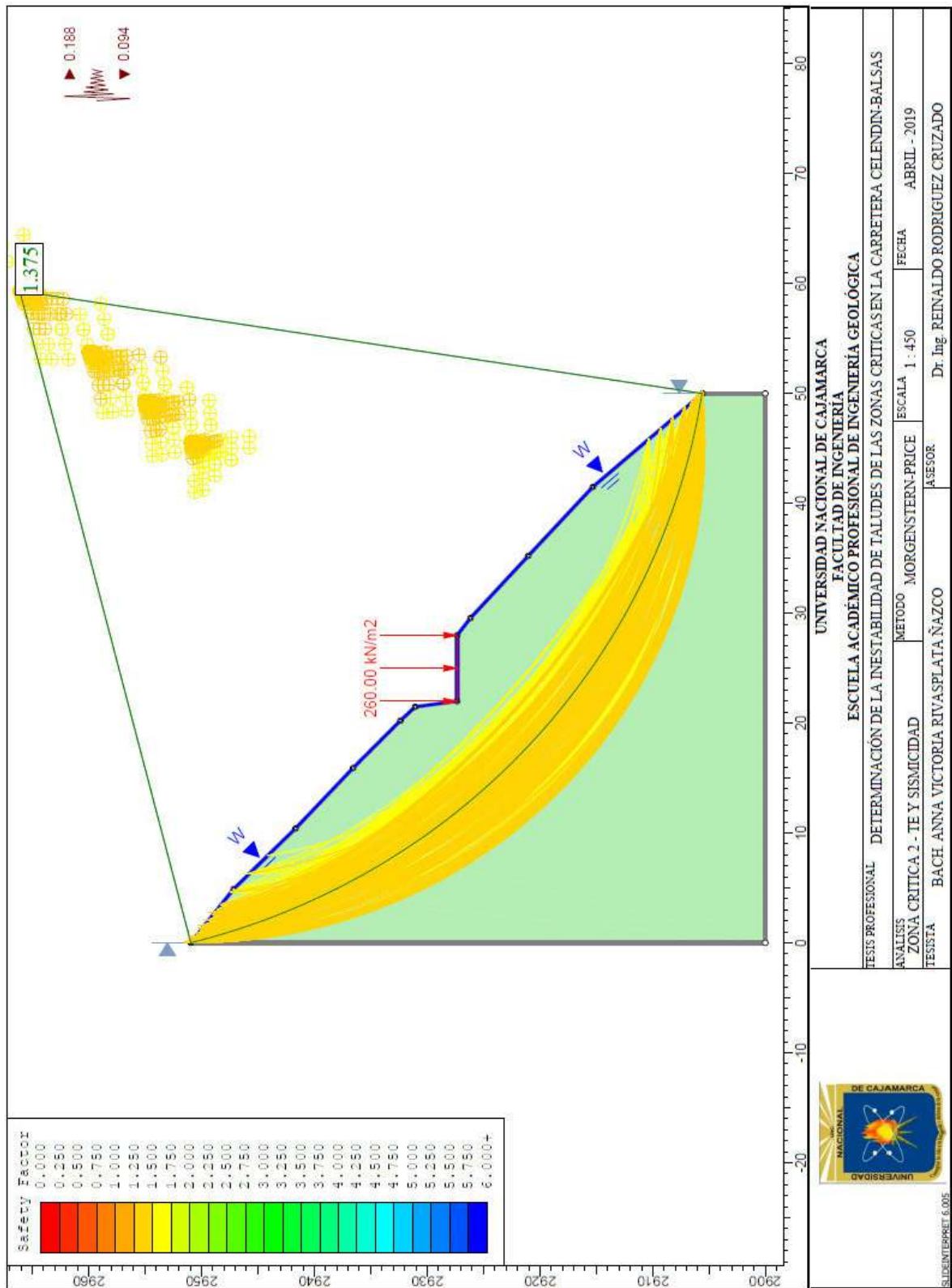


Figura 4.22 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad – Morgenster - Price, Zona Crítica 2

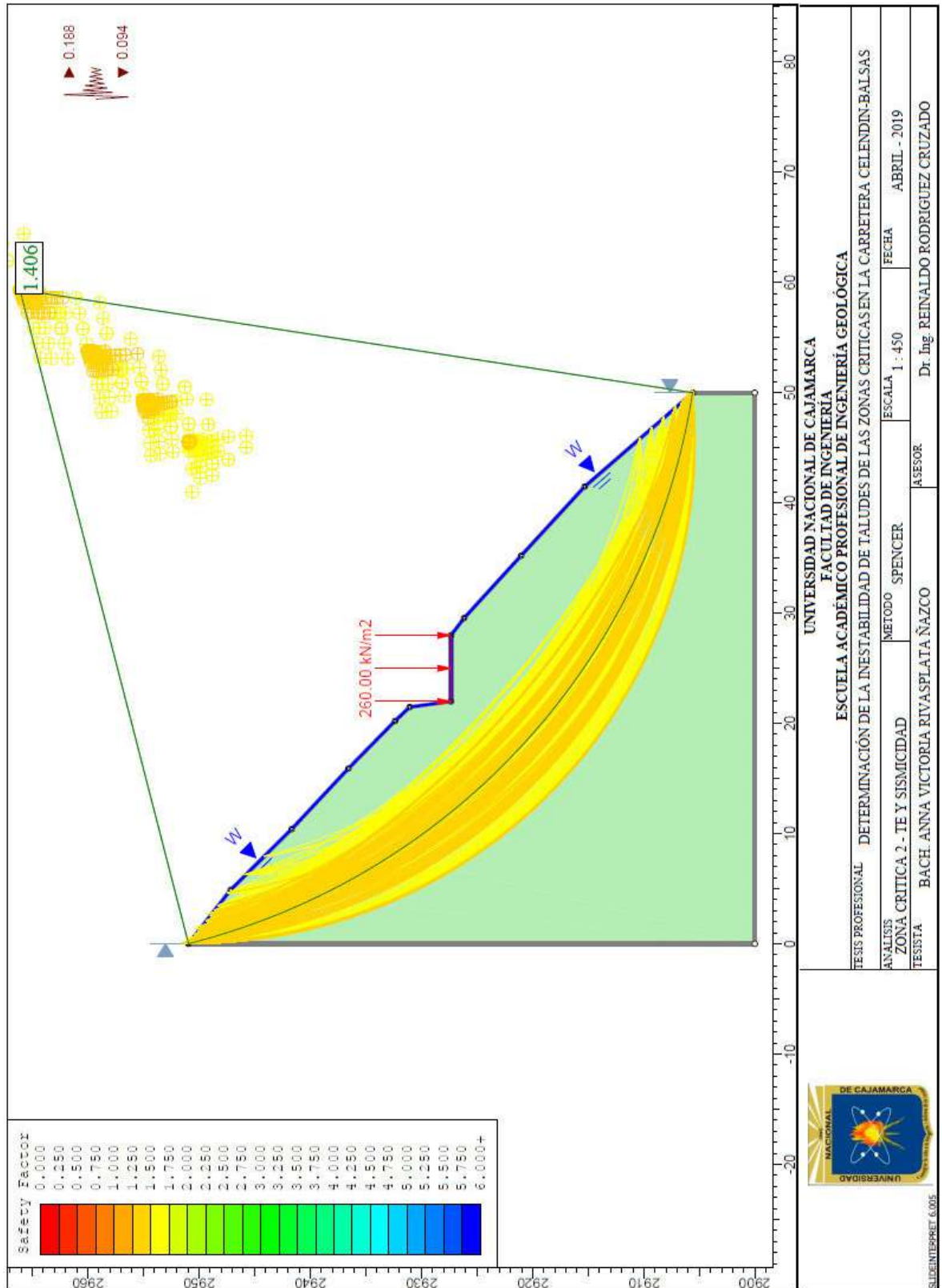


Figura 4.23 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas y Sismicidad – Spencer, Zona Crítica 2

### 4.5.3 Zona crítica 03: Km 120+000 – Km120+800

#### A. Descripción de los taludes

Los taludes en este tramo de la vía presentan características desfavorables para la estabilidad por: alto ángulo en las laderas de 45° a 70°, alto fracturamiento de las rocas como se observa en la foto de detalle, meteorización moderada de las calizas de la Formación Cajamarca; sumado a esto factores como la calidad de voladura.

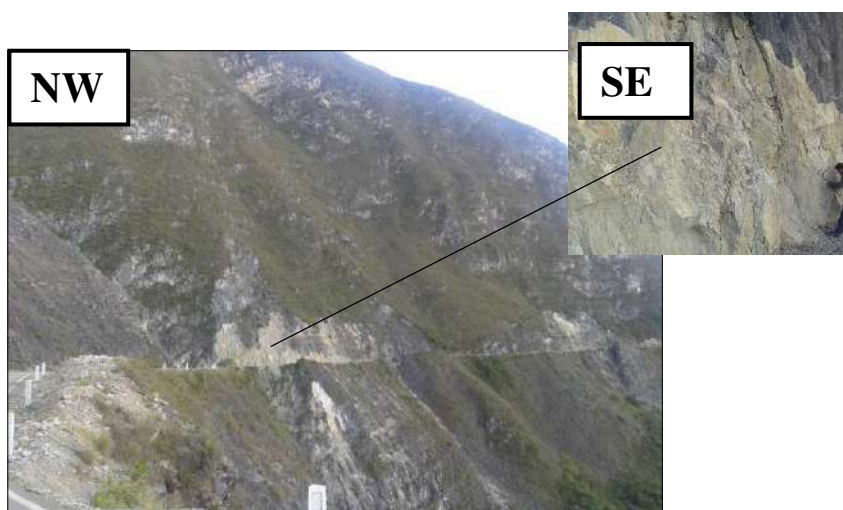


Foto 4.11 Taludes con características inestables del km 120+200 – km 120+500

#### B. Análisis estructural con Dips

Cuadro 4.7 Dip y DD de las discontinuidades, zona crítica 3

TIPO	D	DD
TALUD	85	110
ESTRATO	31	265
FAMILIA DE DISCONTINUIDADES 1	44	45
FAMILIA DE DISCONTINUIDADES 2	65	110
FAMILIA DE DISCONTINUIDADES 3	71	60

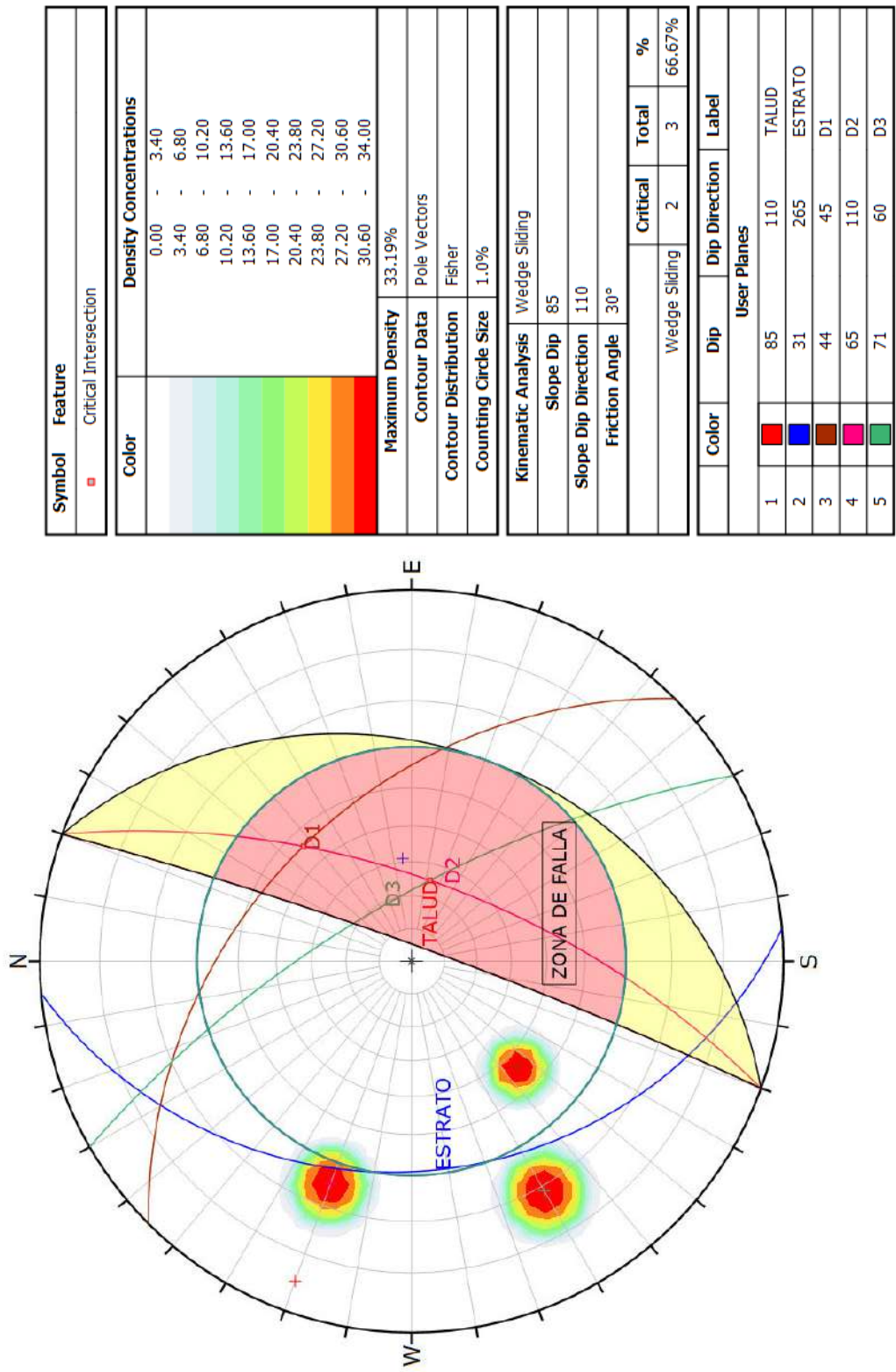


Figura 4.24 Análisis con el Dips, planar y cuña., Zona Crítica 3

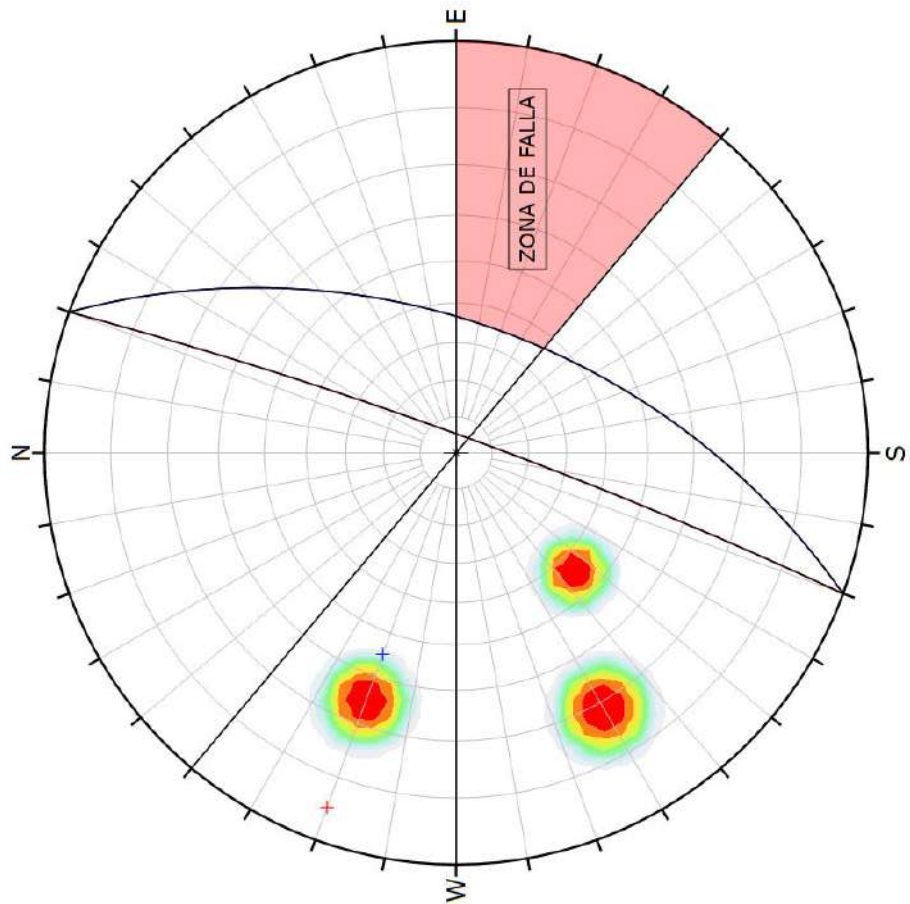
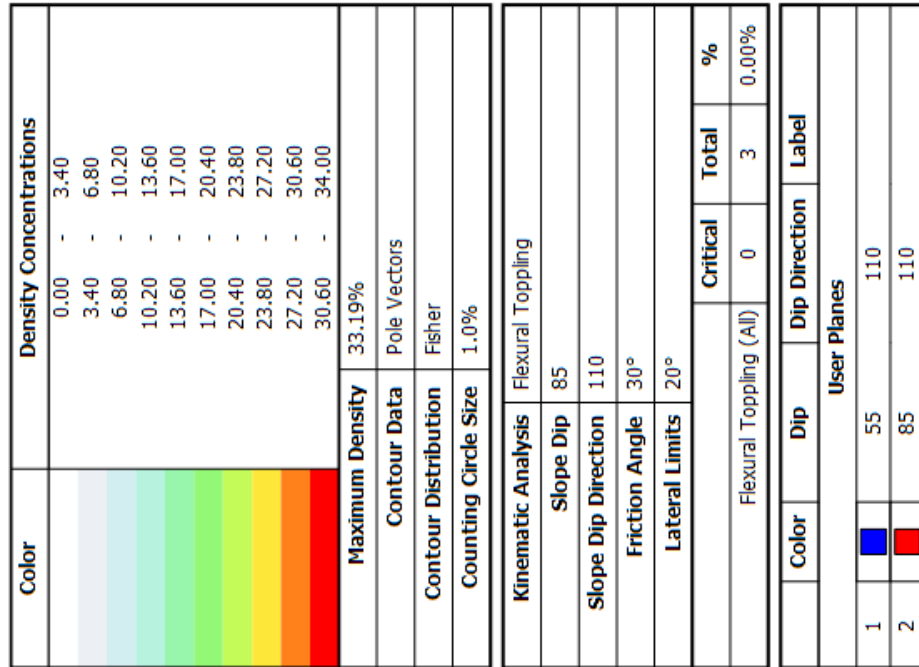


Figura 4.25 Análisis con el Dips., Vuelco, Zona Crítica 3

El análisis con el Software Dips permite identificar a la discontinuidad 2 (D2), como la crítica. Evidencia tipo de falla en cuña, poca probabilidad de falla planar.

### C. Caracterización RMR del macizo rocoso

Clasificación Geomecánica Bieni 1989 (puntajes).

Cuadro 4.8 Valoración RMR, zona crítica 3

1	Resistencia a la compresión uniaxial	7	
2	RQD	17	
3	Separación entre diaclasas	15	
4	Estado de las discontinuidades	Persistencia	2
		Apertura	1
		Rugosidad	5
		Relleno	2
		Alteración	3
5	Condición hidrogeológica	15	
6	Corrección para taludes	-20	
	Total	47	

Se obtiene una roca de clase III, calidad media.

### D. Análisis con el Slide

El análisis ha tomado en cuenta un solo tipo de material calizas, con un peso específico de 24.5 KN/m<sup>3</sup>. Se ha considerado el criterio de Hoek y Brown generalizado para rocas, con una compresión uniaxial de 70 Mpa, con un GSI de 40, y una constante de roca intacta  $m_i$  igual a 10, y un factor de voladura 1. Se ha considerado nivel freático de agua subterránea.

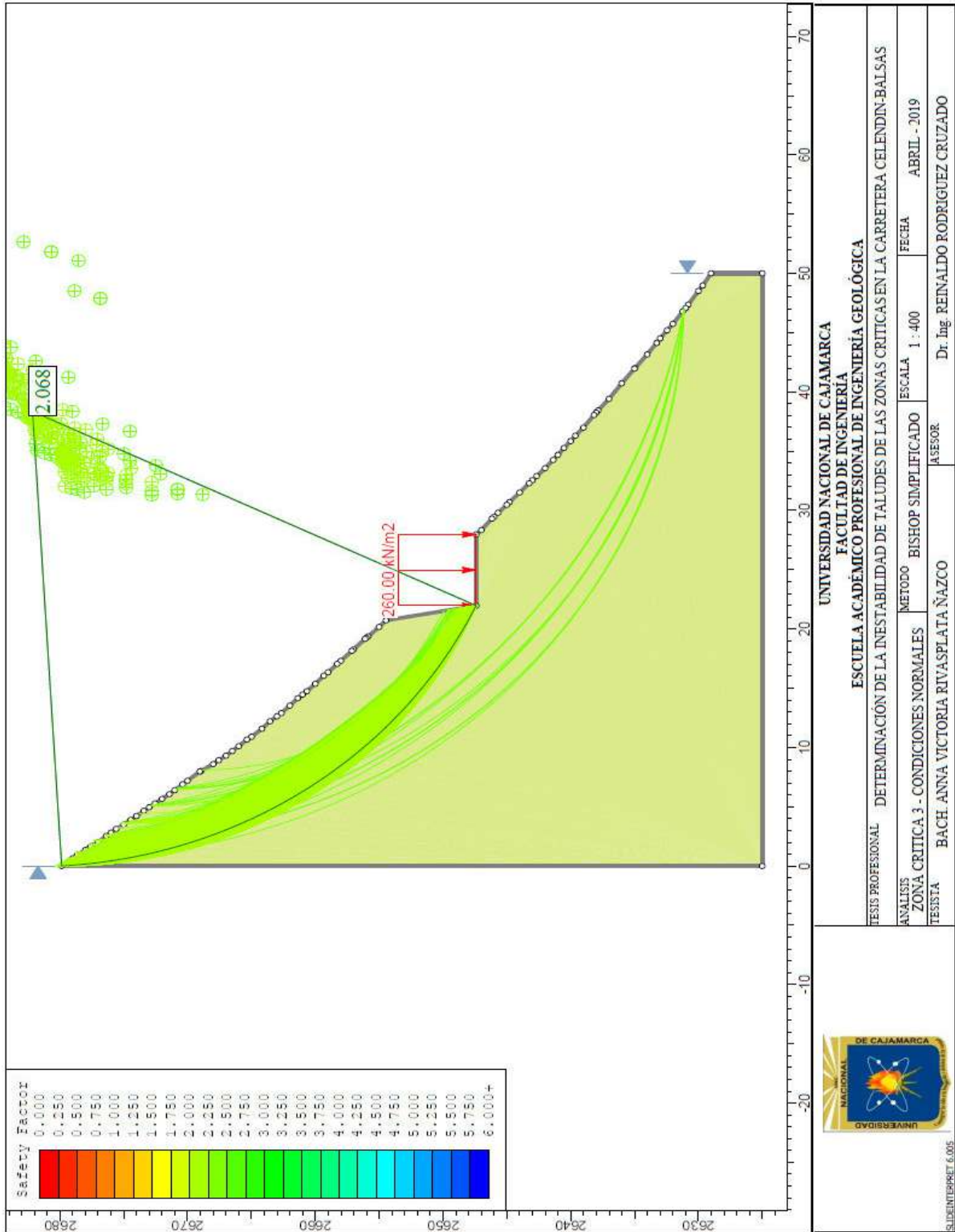


Figura 4.26 Factor de seguridad, Condiciones Normales – Bishop, Zona Crítica 3

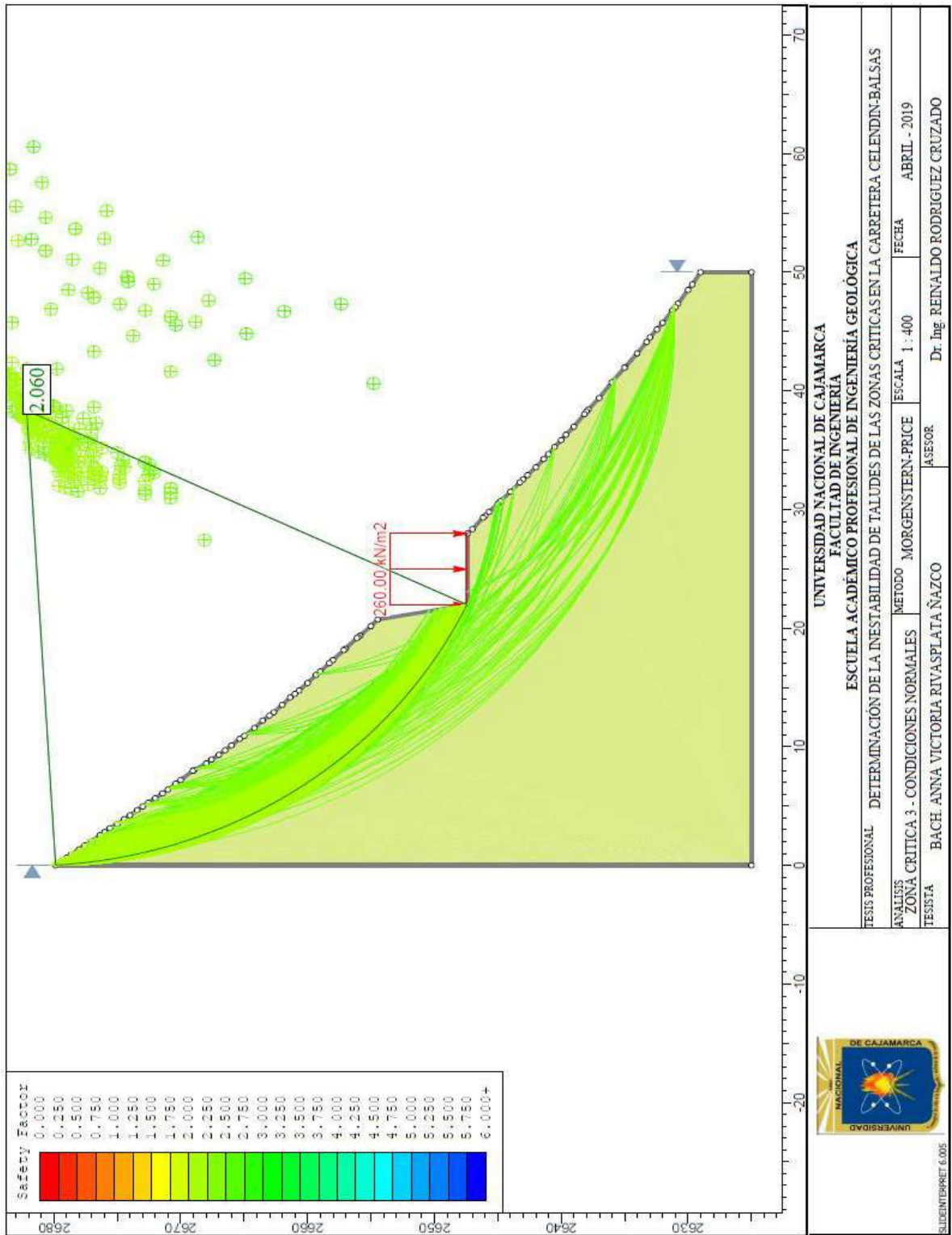


Figura 4.27 Factor de seguridad, Condiciones Normales – Mongerster - Price, Zona Crítica 3



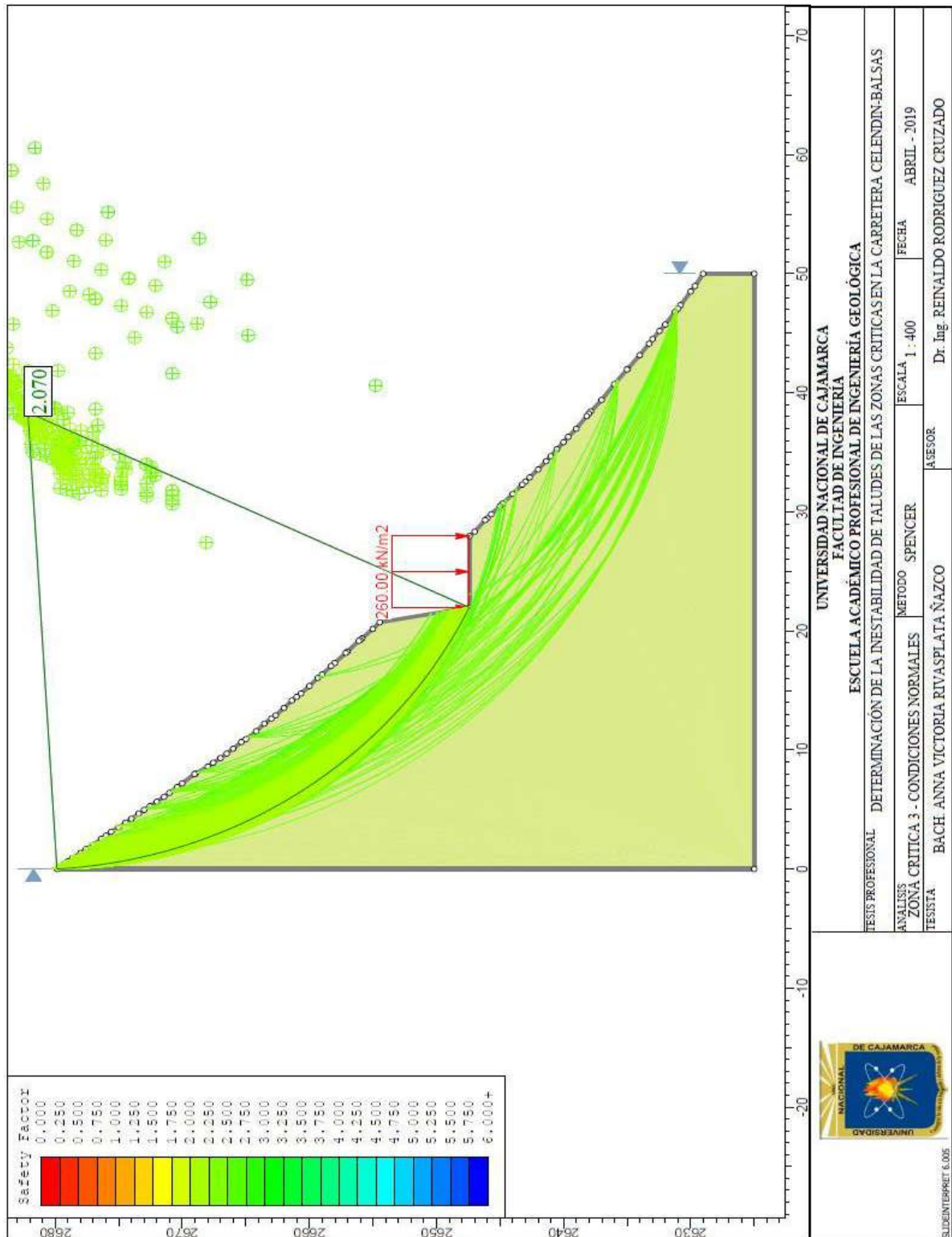


Figura 4.28 Factor de seguridad, Condiciones Normales – Spencer, Zona Crítica 3

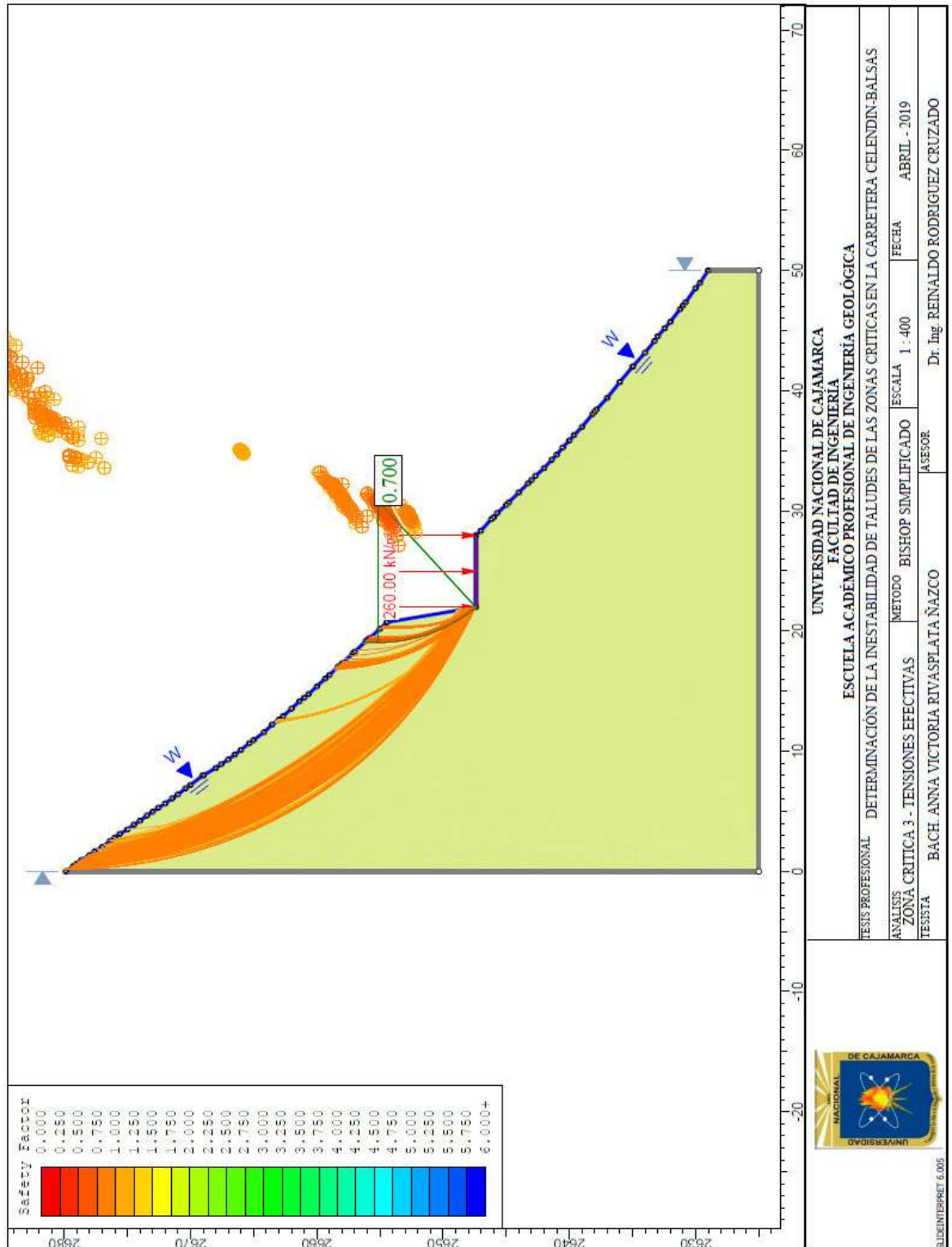


Figura 4.29 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas – Bishop, Zona Crítica 3

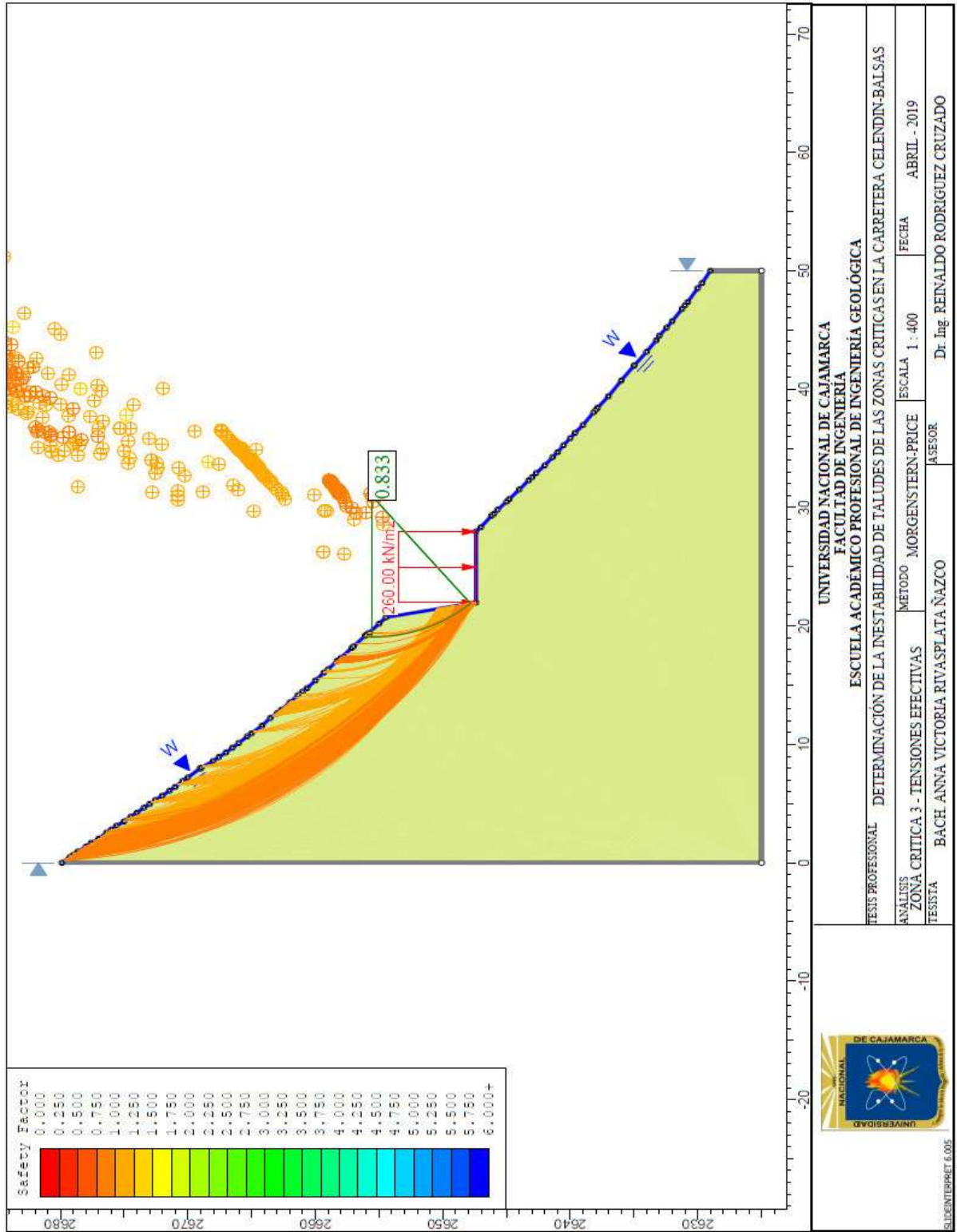


Figura 4.30 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas – Morgenster - Price, Zona Crítica 3

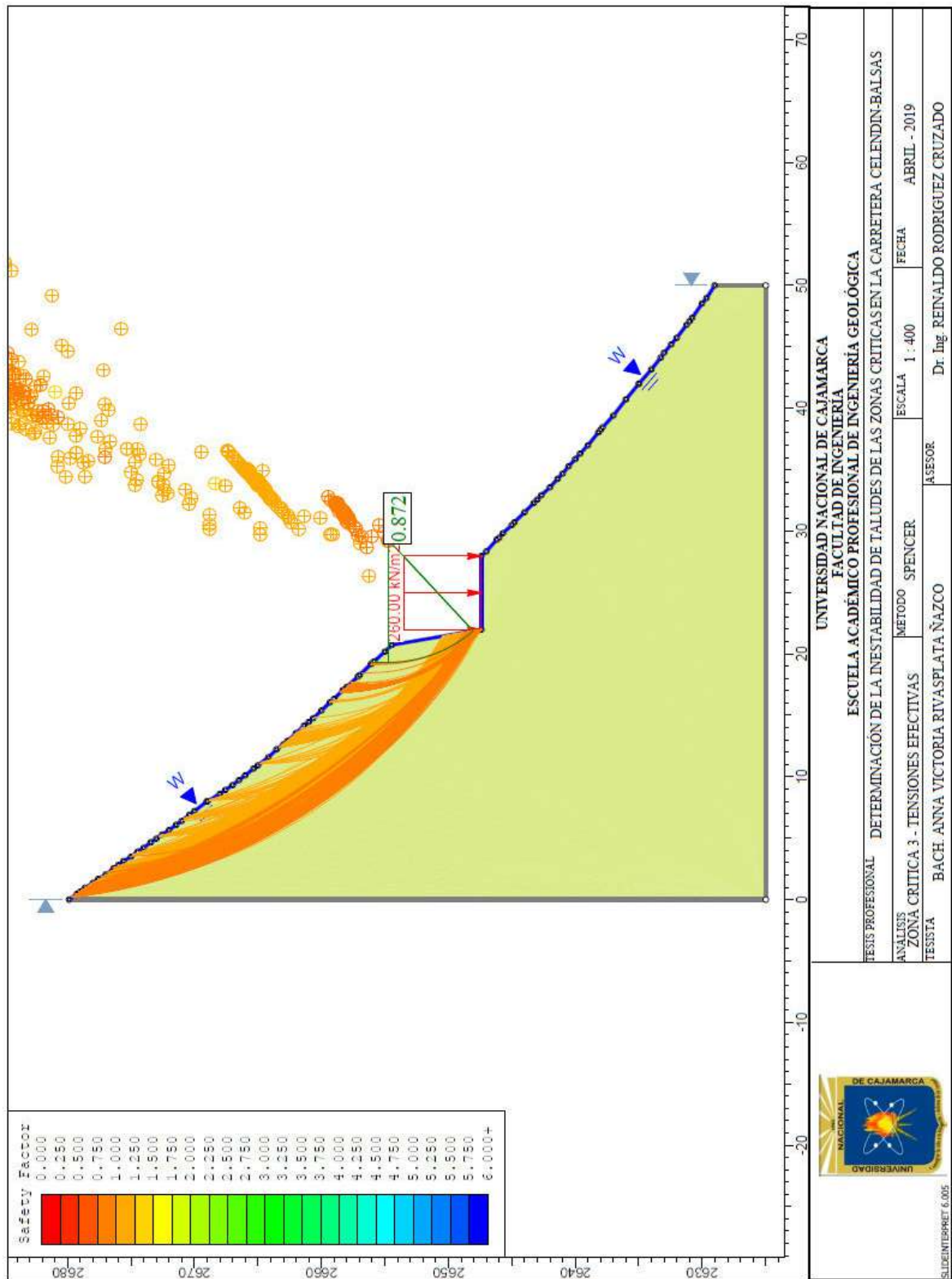


Figura 4.31 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas – Spencer, Zona Crítica 3

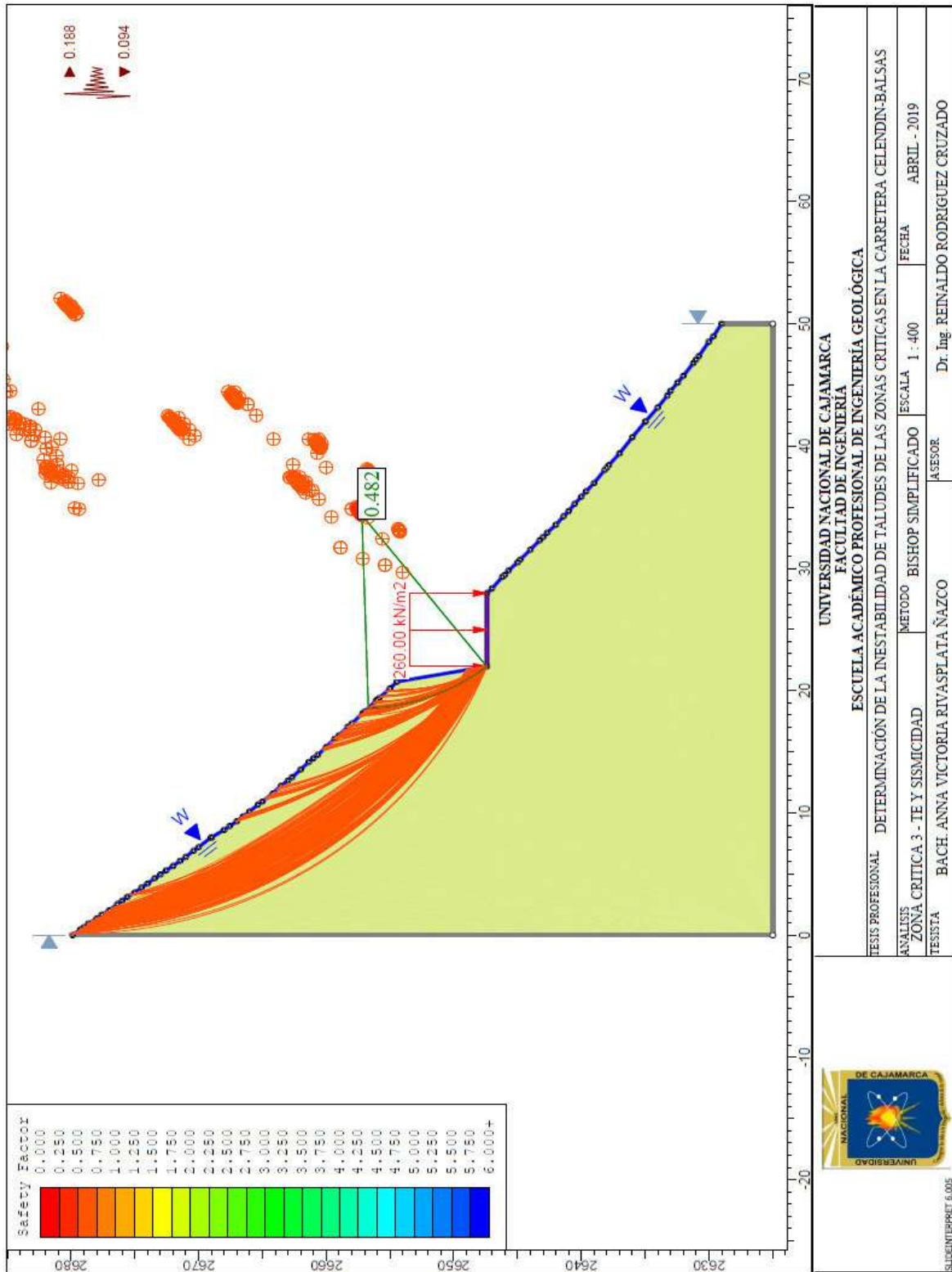


Figura 4.32 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas Y sismicidad – Bishop, Zona Crítica 3

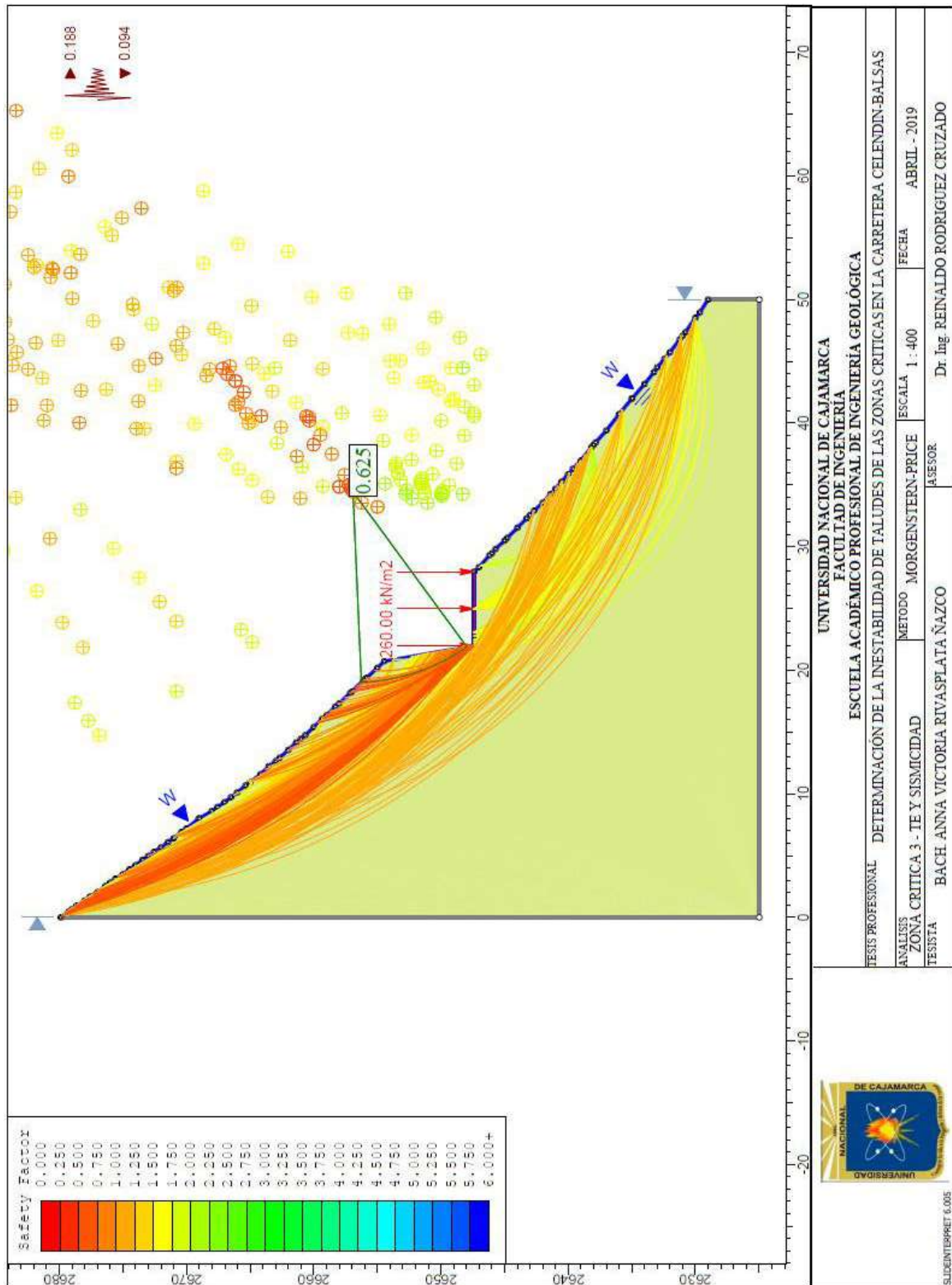


Figura 4.33 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas Y sismicidad – Morgenstern - Price, Zona Crítica 3

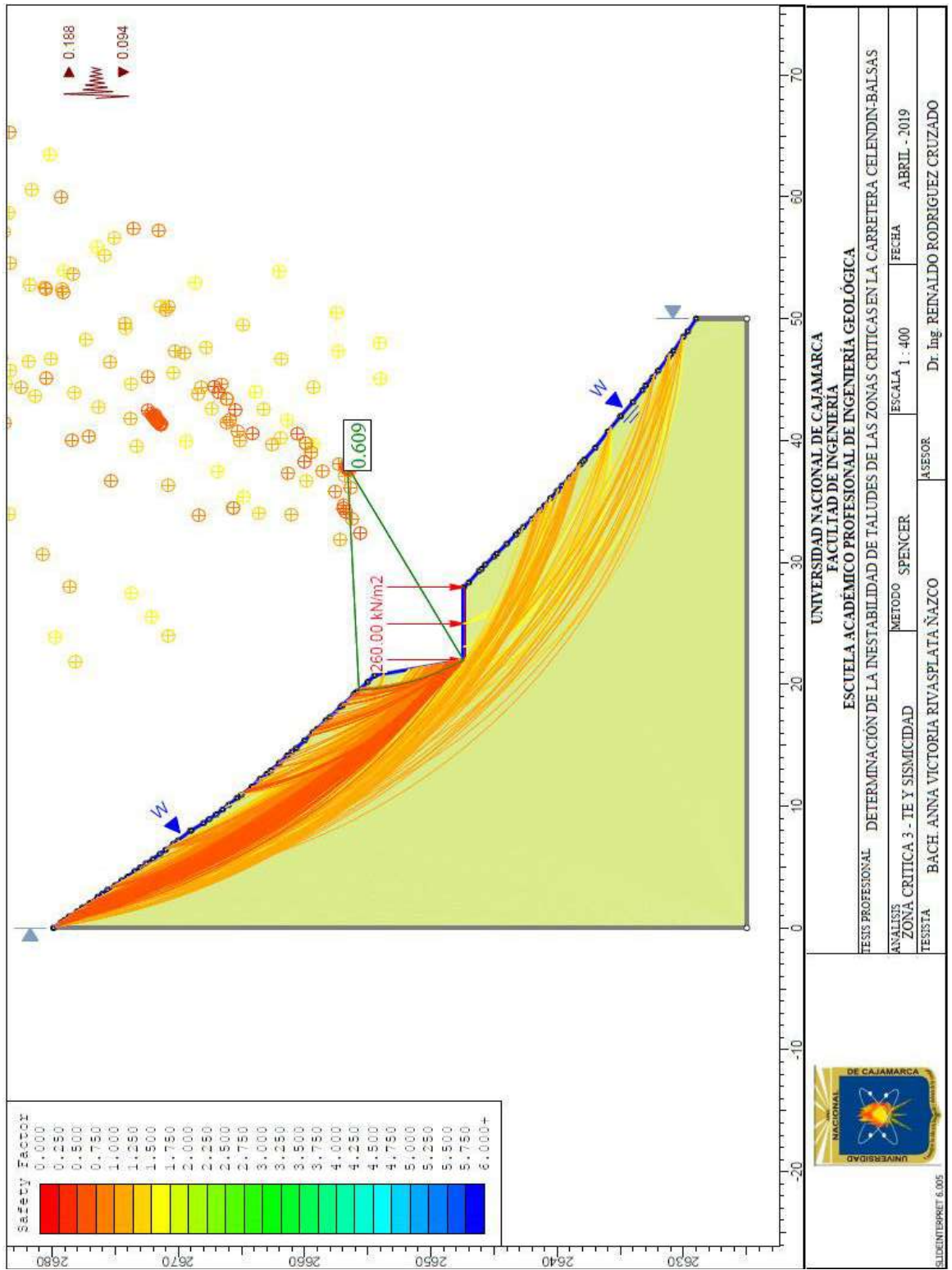


Figura 4.34 Factor de seguridad, Tensiones Efectivas Y sismicidad – Spencer, Zona Crítica 3

## 4.6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Las zonas críticas identificadas en el tramo de la carretera km.112+000 – km. 121+000, son inestables debido a factores geométricos- geoestructurales y propensas a deslizamiento, en especial durante las épocas de lluvias, por lo que se debe plantear soluciones o un mantenimiento a lo largo de este tramo para evitar diferentes accidentes que se puedan presentar.

### Análisis con Slide v. 6.0

Para la interpretación de la información recopilada en los taludes se han elaborado modelamientos de perfiles 2D, determinando el factor de seguridad que tiene los materiales presentes en los taludes. Los parámetros usados por el software geotécnico Slide v. 6.0, para realizar el análisis son:

El tipo de litología (sedimentaria, metamórfica o ígnea), o si es algún tipo de suelo según la clasificación SUCS, el software viene equipado con ciertos valores para las constantes para el método de análisis que se elige. Estos valores han sido comprobados en campo y laboratorio, a través de métodos de ensayos de carga puntual.

Para el análisis de roca usamos el método de de Hoek y Brown generalizado, usa la misma fórmula que se presenta expuesto en el capítulo II, que corresponde al marco teórico y que consiste básicamente en la igualdad de los esfuerzos mayor y menor con la intervención del GSI y del factor D, que es el grado de disturbación que tiene el talud, además de las constantes  $m_b$  y  $m_i$ , que son valores para la resistencia a la compresión uniaxial, se expresa en  $KN/m^2$ , una está en función de la otra, el  $m_i$  es la resistencia a la compresión mostrada en laboratorio y el  $m_b$  es la resistencia a la compresión obtenida en campo de forma empírica, para esto se tiene la clasificación ISRM ( International Society for Rock Mechanics). De esta manera se calcula automáticamente los valores numéricos “a” y “s”.



Otro valor que se considera y que es importante definir en el programa es la cantidad de agua que se tiene presente en el talud, definitivamente el agua juega un papel muy importante en épocas de lluvia pues genera las principales causas de desequilibrio en los taludes. En el programa hay opciones para insertar el nivel freático, e interpretar la acción subterránea de las aguas.

#### 4.7 RESULTADOS

Después del análisis de los taludes del tramo de carretera y la identificación de las zonas críticas el programa informático Slide v. 6.0 generó los siguientes factores de seguridad.

##### Zona critica 01: Km 112+700 – Km114+100

En esta zona se obtuvo un RMR de 39 una roca de clase IV y calidad mala, en estas condiciones se ha construido un talud de 77° de pendiente y dada las condiciones de Compresión uniaxial, GSI, constante  $m_i$  para calizas y un factor pobre de voladura, también se ha dado aceleración sísmica vertical y horizontal obteniéndose un factor de seguridad en condiciones normales 1.651; es decir este talud es estable a largo plazo, en tensiones efectivas tiene un factor de seguridad de 0.118 por lo que se considera inestable, en tensiones efectivas y sismicidad se obtiene un factor de seguridad de 0.250, se vuelve inestable, y puede colapsar en cualquier momento.

Cuadro 4.9 Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide – Zona crítica 1

CÁLCULO DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD (FS) PARA LA ZONA CRÍTICA 1					
FORMACIÓN		FACTOR DE SEGURIDAD (FS)			
NOMBRE	CÓDIGO	CONDICIONES	Bishop Simplificado	Motgenstern - Price	Spencer
Pulluicana	ks-p	Normales	1.621	1.651	1.661
		Tensiones Efectiva	0.118	0.247	0.247
		Tensiones Efectiva y Sismicidad	0.098	0.25	0.609

### Zona critica 02: Km 114+900 – Km115+800

De los datos recogidos en campo se obtiene un RMR de 45 roca de clase III calidad media, roca de mejores características que en la zona critica 01, y realizado el análisis con el software Slide se obtiene un factor de seguridad en condiciones normales de 2.797; en tensiones efectivas tiene un factor de seguridad de 1.287, en tensiones efectivas y sismicidad se obtiene un factor de seguridad de 1.408, todos estos resultados señalan que este talud es estable a largo plazo.

Cuadro 4.10 Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide – Zona crítica 2

CÁLCULO DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD (FS) PARA LA ZONA CRÍTICA 2					
FORMACIÓN		FACTOR DE SEGURIDAD (FS)			
NOMBRE	CÓDIGO	CONDICIONES	Bishop Simplificado	Motgenstern - Price	Spencer
Pulluicana	ks-p	Normales	2.806	2.797	2.809
		Tensiones Efectiva	1.826	1.787	1.809
		Tensiones Efectiva y Sismicidad	1.408	1.375	1.406

### Zona critica 03: Km 120+000 – Km120+800

En esta zona se obtiene un RMR de 47, al igual que en la zona crítica 02 una roca de clase III y calidad media, pero se puede apreciar que la pendiente de la ladera es de 45° a 70° formando escarpas, al realizar el análisis con el software Slide se obtiene un factor de seguridad en condiciones normales de 2.068; es decir este talud es estable a largo plazo, en tensiones efectivas tiene un factor de seguridad de 0.872 por lo que se considera estable a corto plazo, en tensiones efectivas y sismicidad se obtiene un factor de seguridad de 0.625, se vuelve inestable.

Cuadro 4.11 Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide – Zona crítica 3

CÁLCULO DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD (FS) PARA LA ZONA CRÍTICA 3					
FORMACIÓN		FACTOR DE SEGURIDAD (FS)			
NOMBRE	CÓDIGO	CONDICIONES	Bishop Simplificado	Motgenstern - Price	Spencer
Cajamarca	ks-ca	Normales	2.068	2.06	2.07
		Tensiones Efectiva	0.7	0.833	0.872
		Tensiones Efectiva y Sismicidad	0.482	0.625	0.609

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES**

- Las características geotécnicas presentes en los taludes de la carretera Celendín – Balsas Km 112+000 al 121+000, están relacionados a factores geológicos, estructurales. En cuanto a la litología, alteración, parámetros estructurales, resistencia a la compresión uniaxial, ángulo de fricción, presencia de agua, fueron medidos e identificados en campo; teniendo una estimación de dichos factores, además se determinó que la inestabilidad de los taludes está determinada por la calidad de la roca y principalmente por el ángulo y altura de talud.
- En el tramo de la carretera de investigación se evaluaron tres zonas críticas de las cuales según resultados obtenido en gabinete dos son de regular calidad y una de mala calidad; en el análisis estructura mediante el software Dips se determinó que la dirección de los estratos tiene tendencia hacia el SE propiciando falla en cuña principalmente, las discontinuidades desfavorables buzan en contra al talud.
- Al realizar el cartografiado geológico - estructural se pudo apreciar que esta zona esta intensamente afectada por la tectónica, con presencia de diaclasas y fallas inversas que han fracturado la roca permitiendo el ingreso del agua y acelerando el proceso de meteorización y por ende afectado la calidad de la roca, así mismo geomecanicamente están afectadas por los flujos subterráneos, los que disminuyen sus valores de resistencia.

- No siempre se da una relación directa entre calidad de la roca y estabilidad de un talud, pues una roca de calidad buena con un mal diseño de talud se convierte en inestable, asimismo una roca de mala calidad con un buen diseño de talud puede tener un comportamiento estable.
- El resultado final de la investigación determinó que los Factores de Seguridad (FS) están entre 0.094 y 2.836 calculados con software Slide 6.0, definiéndose condiciones de estabilidad desde estables a corto plazo como es el caso de la zona crítica 1 y 3 y a largo plazo como el caso de la zona crítica 2.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Investigar sobre los diseños de los taludes de la carretera Celendín – Balsas Km 112+000 al 121+000, para una reconfiguración de dichos diseños, así como el control de las filtraciones de agua las cuales garantizarían la estabilidad de estos taludes.
- Se realizar un monitoreo de taludes de forma continua para seguir evaluando su inestabilidad debido a que las condiciones del suelo y/o roca y las condiciones detonantes están en constante cambio, y así tomar las medidas de seguridad para prevenir pérdidas humanas y económicas. Así como un adecuado trabajo de mantenimiento de las obras destinadas a la estabilización de estos taludes.
- Realizar estudios más complejos recopilando datos de todos los factores o parámetros que afecten la estabilidad de los taludes, a través de ensayos de campo o laboratorio más como por ejemplo incluir ensayos triaxiales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, F. y Andreu, F. (2006). Manual de Ingeniería de Taludes. Madrid, España. Instituto Geológico Minero de España (IGME).
- Braja, M. (1984). Fundamentos de Ingeniería geotécnica, Edit. Thomson learning. México.
- Corominas, J. (s.f.). Tipos de rotura en laderas y taludes. Barcelona, España.
- Dávila, J. (2011). Diccionario Geológico. Lima-Perú. Ingemmet.
- Escobar, D; Valencia, E. (2012). Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín-Bogotá en el tramo vía entre Marinilla y Santuario. Boletín de Ciencias de la Tierra (31), 51-64.
- Gonzales de Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica. PEARSON. Madrid.
- Hoek, E. y Brown, E. (1997). Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Práctica. Primer Taller Geotécnico Interdivisional. Chuquicamata-Chile.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. y Corkum, B. (2002). El Criterio de Rotura de Hoek-Brown-Edición 2002.
- Li, R, Espinoza, J. (2010). Consideración de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares. Tecnología y Ciencias del Agua. I (3), 89-107.
- Mercado, F. (2014). Análisis de inestabilidad de taludes en zonas críticas en la carretera Cajamarca-Celendín en el tramo Km. 52+000-Km. 94+400. Tesis, Universidad Nacional de Cajamarca, Ingeniería Geológica, Cajamarca, para optar por el título de ingeniero geólogo.

- Mora, R. (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. Ingeniería. Investigación y Tecnología, XIII (1), 55-68.
- Mora y Rojas (2009). Análisis del efecto del humedecimiento en la falla de talud en el km 240+000 del cuerpo A de la autopista Cuernavaca-Acapulco. Ingeniería Revista Académica, XII (3), 17-28.
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid, España.
- Rodríguez, J. Ma. y Gonzales de Vallejo, L., (s/f). Manual de Ingeniería de Taludes. Madrid, España. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Rodríguez, R. (2016). Método de investigación Geológico - Geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos, Zona Ronquillos - Corisorgona. (Tesis de Maestría) Universidad Mayor de San Marcos.
- Sanhueza y Rodríguez (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. Revista de la Construcción, 12(1), 17-29.

# **ANEXOS**

1. Fichas de reconciliación de Datos
2. Planos de Ubicación, Satelital, Morfogenético, Topográfico y Geológico

REGISTRO GEOTÉCNICO		PROPIEDADES Y FACTORES DE INFLUENCIA CARACTERÍSTICAS										RRC															
REGISTRO Nº: Datos de discontinuidades y suelos												RRC															
Riesgo: Alto												RRC															
SISTEMA: WGS84												RRC															
ESTADO	PROYECTO	PROPIEDADES Y FACTORES DE INFLUENCIA CARACTERÍSTICAS										Riesgo	Fact.														
		TIPO	RESISTO (MPa)	DIRECCIÓN	RESISTO (MPa)	ABERTURA (mm)	ESPESOR (cm)	ESPESOR (cm)	ABERTURA (mm)	ESPESOR (cm)	ESPESOR (cm)			ABERTURA (mm)	ESPESOR (cm)												
ESTE	NORTE	COTA	FORMAC.	LITOLÓG.	METEOROL.	GRADO DE FRACT.	SUD	λ	ND/m	TIPO	RESISTO (MPa)	DIRECCIÓN	RESISTO (MPa)	ABERTURA (mm)	ESPESOR (cm)	ESPESOR (cm)	ABERTURA (mm)	ESPESOR (cm)	ABERTURA (mm)	ESPESOR (cm)	ABERTURA (mm)	ESPESOR (cm)	Riesgo	Fact.			
																									ESTADO	PROYECTO	
1	01333924301	3024	caliza	caliza	4	1	60/15	25		T	60	77	75	1	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	1	1	
										E	60	80	12	10	4	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	1	1
										D	40	80	10	10	4	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	1	1
										D	30	40	75	10	4	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	1	1
Continuo caído de roca, calizas frías y frías, meteorizadas, con arcillas, grupo pulverulentos, a través de la zona crítica de la zona crítica superior del talud este condicional																											

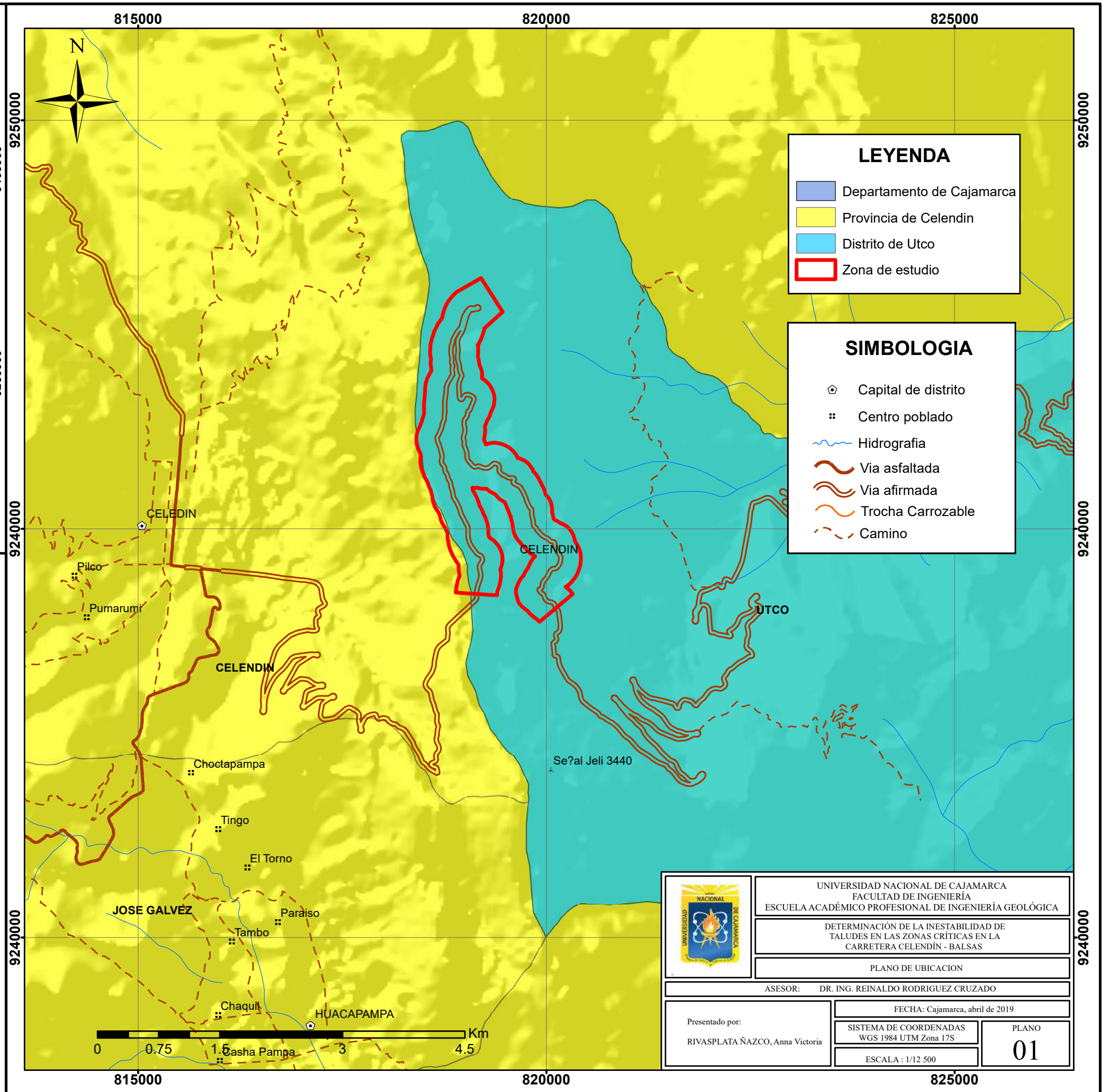
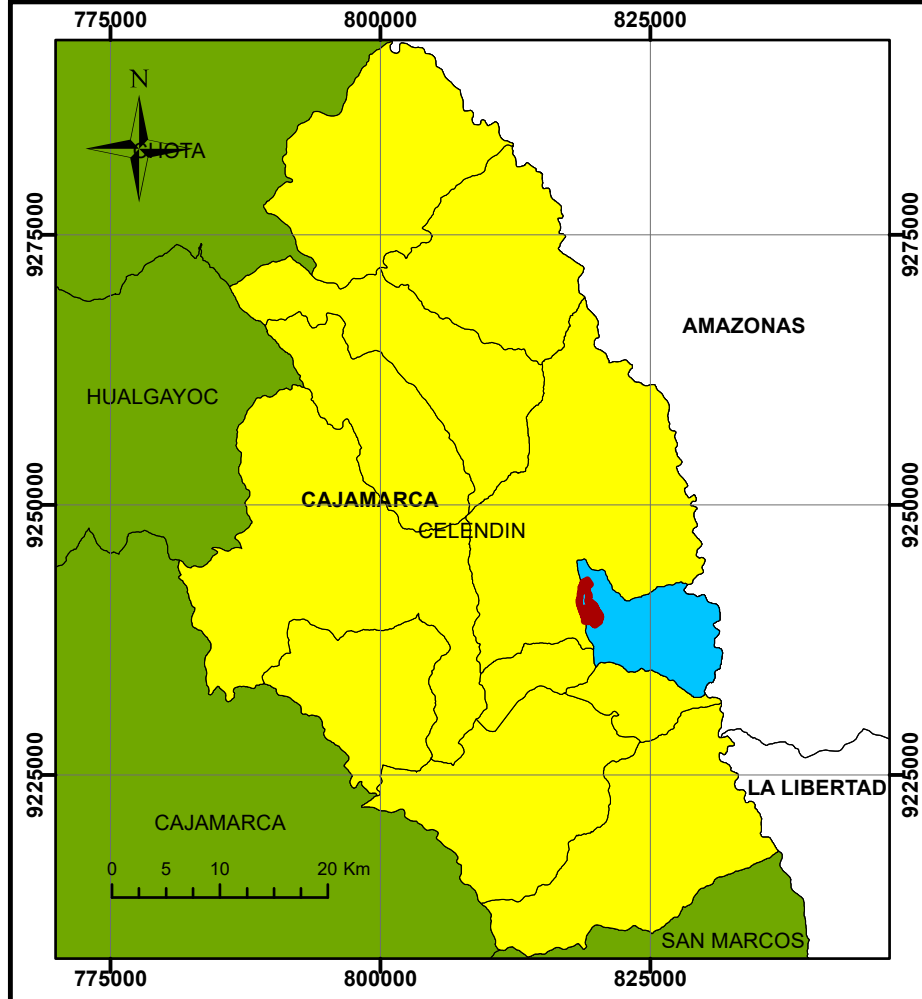
Ficha de Registro de la Zona Crítica 1





REGISTRO GEOTECNICO		DESCRIPCION DE LA ZONA CRITICA		UBICACION		EVALUACION		RIESGO		RECOMENDACIONES		OBSERVACIONES		FECHA		AUTOR	
REGISTRO N°: 123456789		DESCRIPCION DE LA ZONA CRITICA		UBICACION		EVALUACION		RIESGO		RECOMENDACIONES		OBSERVACIONES		FECHA		AUTOR	
Dpto. Madre de Dios		Municipio de...		Calle...		...		...		...		...		...		...	
SISTEMA: WESSA		MATERIALES		TIPO		EVALUACION		RIESGO		RECOMENDACIONES		OBSERVACIONES		FECHA		AUTOR	
ESTADO		LITOLOGICO		TIPO		EVALUACION		RIESGO		RECOMENDACIONES		OBSERVACIONES		FECHA		AUTOR	
ESTE		NORTE		COTA		LITOLOGICO		TIPO		EVALUACION		RIESGO		RECOMENDACIONES		AUTOR	
3		814570425416		2711		Sede		Edific		...		...		...		...	
Dta. predominantemente desiguorobis		en la zona de las viviendas		zona de investigación		mederada		...		...		...		...		...	

Ficha de Registro de la Zona Crítica 3



**LEYENDA**

- Departamento de Cajamarca
- Provincia de Celendin
- Distrito de Utco
- Zona de estudio

**SIMBOLOGIA**

- + Capital de distrito
- :: Centro poblado
- Hidrografia
- Via asfaltada
- Via afirmada
- Trocha Carrozable
- Camino



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

DETERMINACIÓN DE LA INESTABILIDAD DE  
TALUDES EN LAS ZONAS CRÍTICAS EN LA  
CARRETERA CELENDÍN - BALSAS

PLANO DE UBICACION

ASESOR: DR. ING. REINALDO RODRIGUEZ CRUZADO

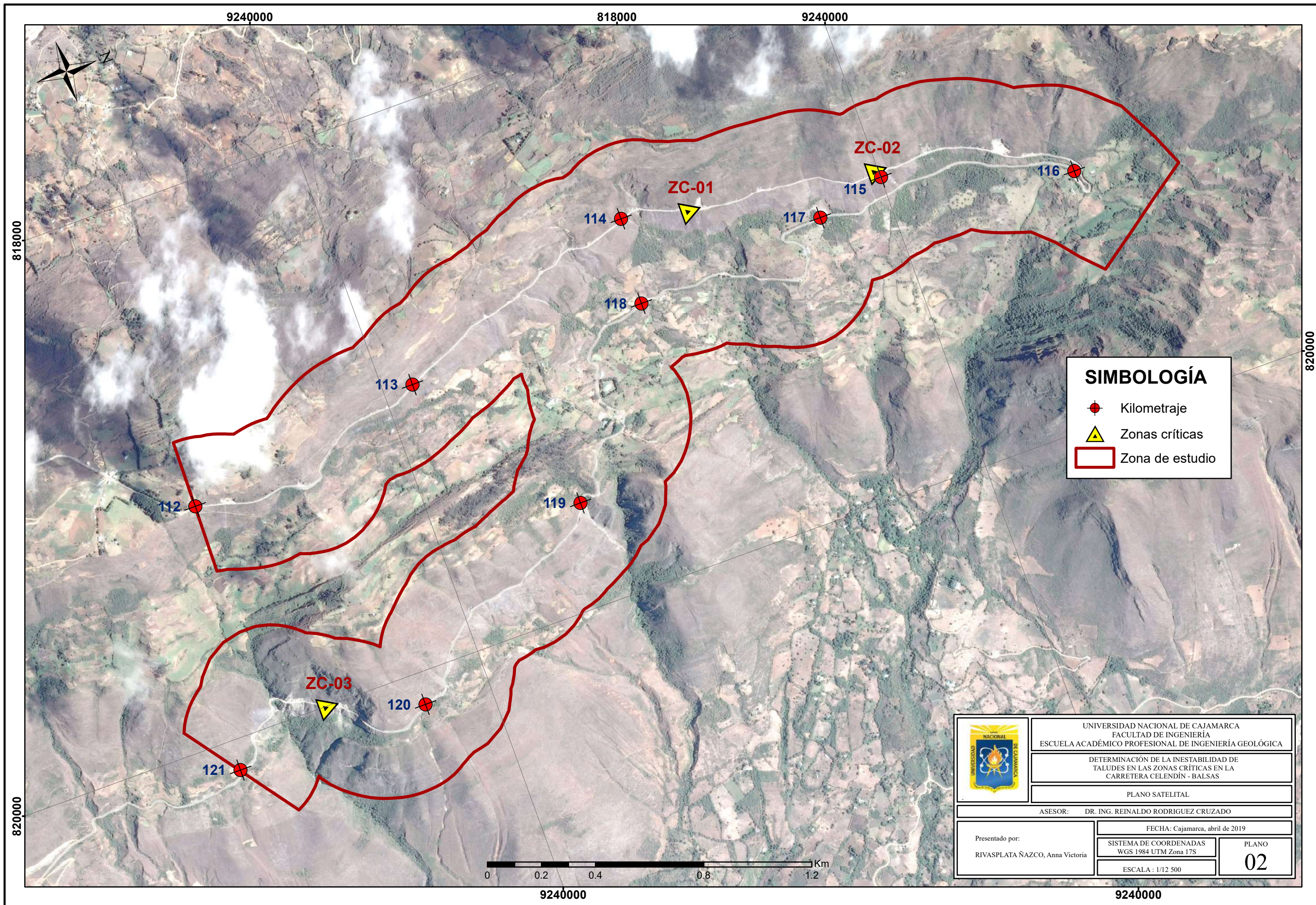
Presentado por:  
RIVASPLATA ÑAZCO, Anna Victoria

FECHA: Cajamarca, abril de 2019

SISTEMA DE COORDENADAS  
WGS 1984 UTM Zona 17S


ESCALA : 1/12 500

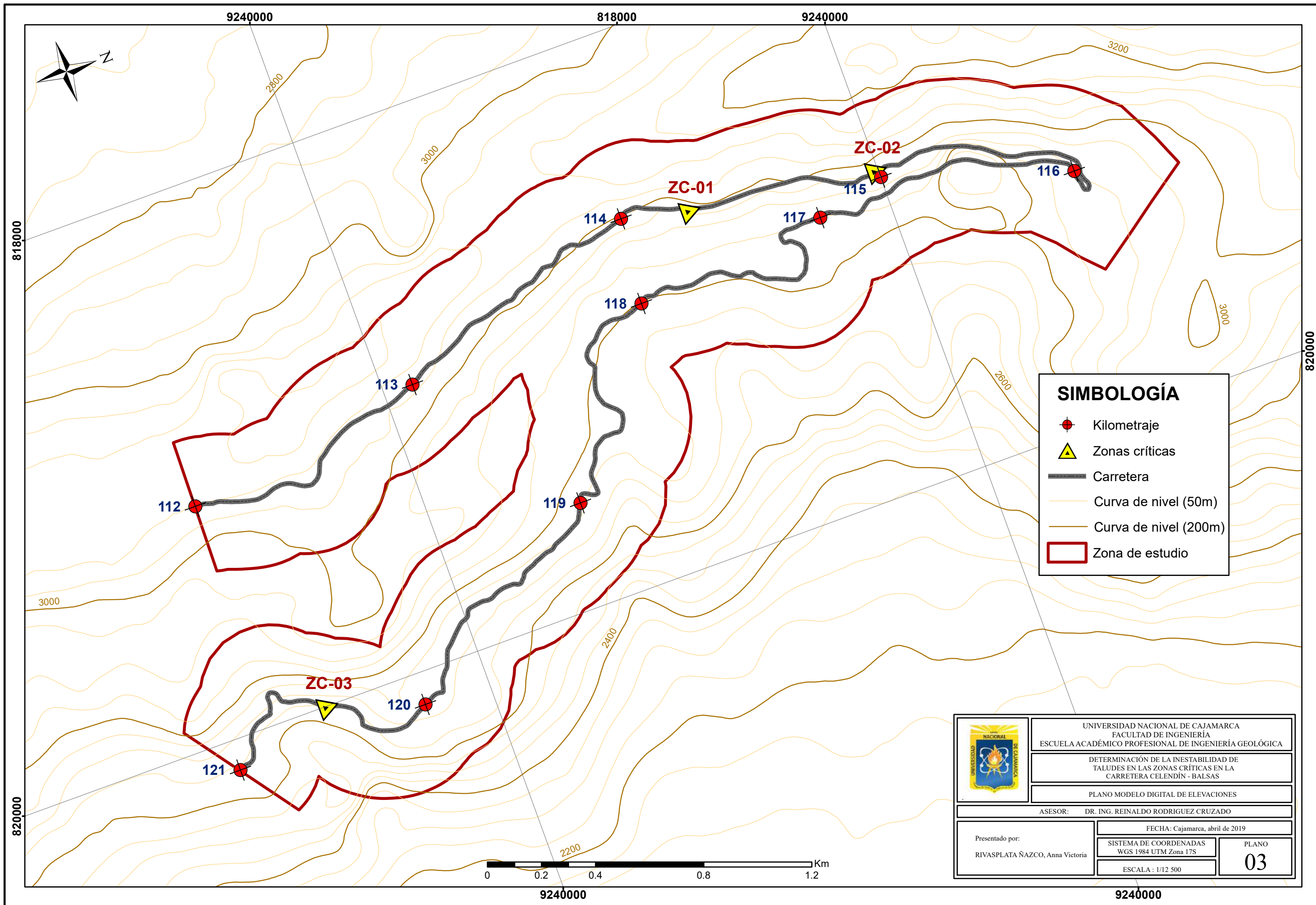
PLANO  
**01**



**SIMBOLOGÍA**


- Kilometraje
- Zonas críticas
- Zona de estudio

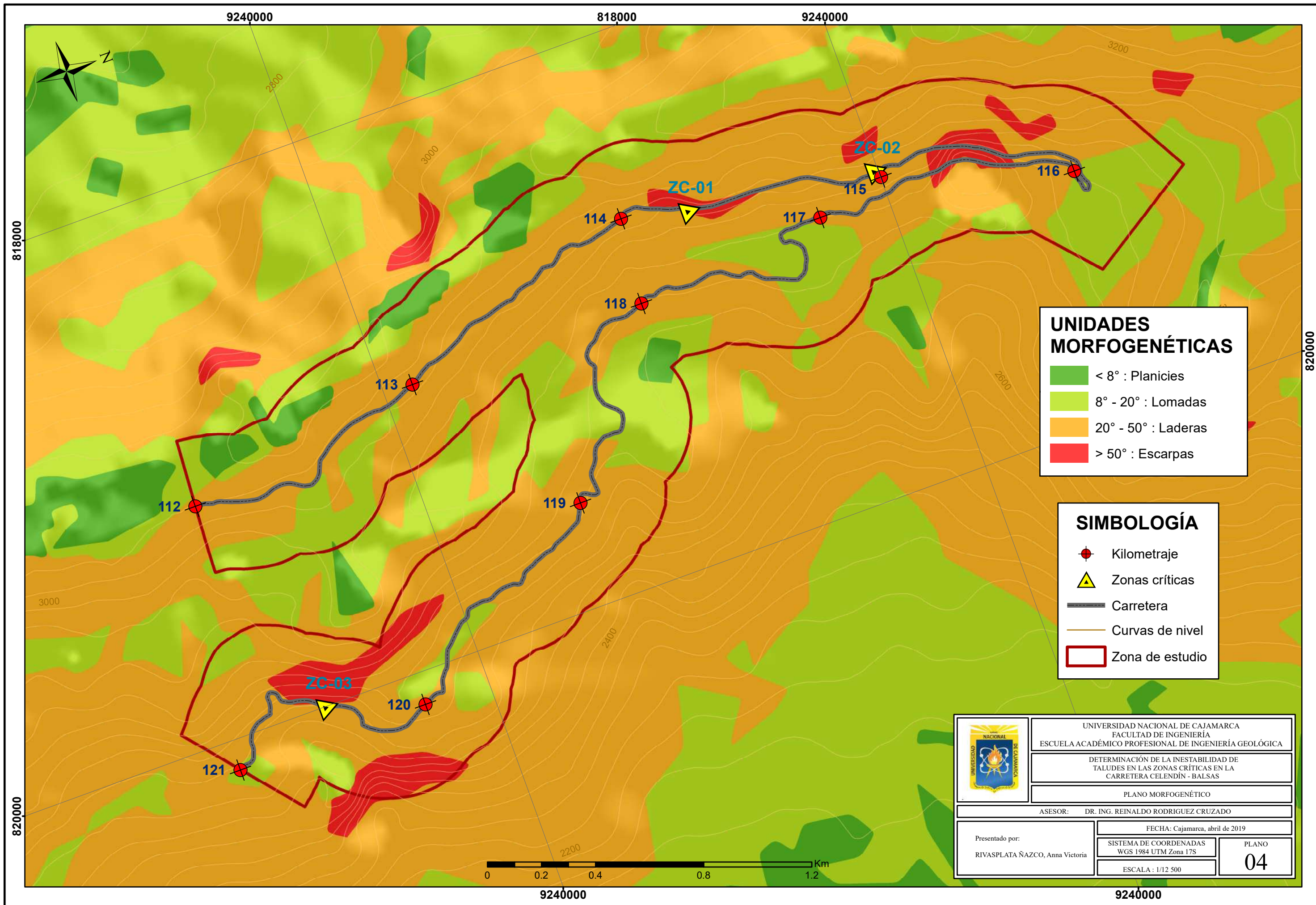
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	DETERMINACIÓN DE LA INESTABILIDAD DE TALUDES EN LAS ZONAS CRÍTICAS EN LA CARRETERA CELENDÍN - BALSAS	
PLANO SATELITAL		
ASESOR: DR. ING. REINALDO RODRIGUEZ CRUZADO		
Presentado por: RIVASPLATA NAZCO, Anna Victoria	FECHA: Cajamarca, abril de 2019	
	SISTEMA DE COORDENADAS WGS 1984 UTM Zona 17S	PLANO <b>02</b>
	ESCALA: 1/12 500	



**SIMBOLOGÍA**

- Kilometraje
- Zonas críticas
- Carretera
- Curva de nivel (50m)
- Curva de nivel (200m)
- Zona de estudio

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	DETERMINACIÓN DE LA INESTABILIDAD DE TALUDES EN LAS ZONAS CRÍTICAS EN LA CARRETERA CELENDÍN - BALSAS	
PLANO MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES		
ASESOR: DR. ING. REINALDO RODRIGUEZ CRUZADO		
Presentado por: RIVASPLATA ÑAZCO, Anna Victoria	FECHA: Cajamarca, abril de 2019	
	SISTEMA DE COORDENADAS WGS 1984 UTM Zona 17S	PLANO <b>03</b>
	ESCALA: 1/12 500	



**UNIDADES MORFOGENÉTICAS**

- < 8° : Planicies
- 8° - 20° : Lomadas
- 20° - 50° : Laderas
- > 50° : Escarpas

**SIMBOLOGÍA**

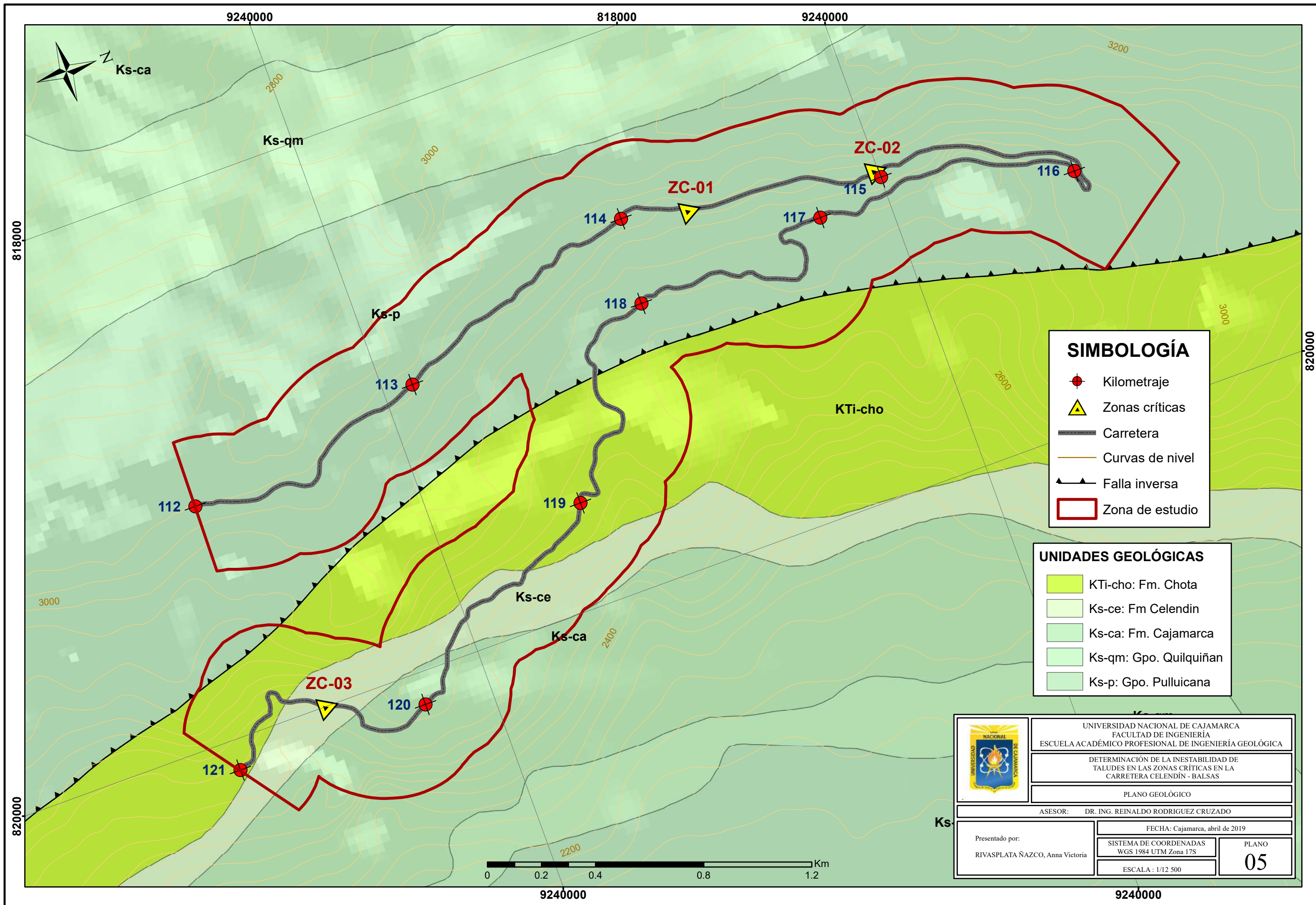
- Kilometraje
- ▲ Zonas críticas
- Carretera
- Curvas de nivel
- Zona de estudio

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	DETERMINACIÓN DE LA INESTABILIDAD DE TALUDES EN LAS ZONAS CRÍTICAS EN LA CARRETERA CELENDÍN - BALSAS	
PLANO MORFOGENÉTICO		
ASESOR: DR. ING. REINALDO RODRIGUEZ CRUZADO		
Presentado por: RIVASPLATA NAZCO, Anna Victoria		FECHA: Cajamarca, abril de 2019
SISTEMA DE COORDENADAS WGS 1984 UTM Zona 17S		PLANO <span style="font-size: 24px; font-weight: bold;">04</span>
ESCALA: 1/12 500		



924000

924000



**SIMBOLOGÍA**

- Kilometraje
- Zonas críticas
- Carretera
- Curvas de nivel
- Falla inversa
- Zona de estudio

**UNIDADES GEOLÓGICAS**

- KTi-cho: Fm. Chota
- Ks-ce: Fm Celendin
- Ks-ca: Fm. Cajamarca
- Ks-qm: Gpo. Quilquiñan
- Ks-p: Gpo. Pullucana

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
	DETERMINACIÓN DE LA INESTABILIDAD DE TALUDES EN LAS ZONAS CRÍTICAS EN LA CARRETERA CELENDÍN - BALSAS	
PLANO GEOLÓGICO		
ASESOR: DR. ING. REINALDO RODRIGUEZ CRUZADO		
Presentado por: RIVASPLATA ÑAZCO, Anna Victoria	FECHA: Cajamarca, abril de 2019	
	SISTEMA DE COORDENADAS WGS 1984 UTM Zona 17S	PLANO <b>05</b>
	ESCALA: 1/12 500	



924000