

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



TESIS PROFESIONAL

**COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES CRÍTICOS
DE LA CARRETERA LAJAS – EL TAYAL
PROVINCIA DE CHOTA**

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

**Presentado por:
Bach. Cluber Magayani Rojas Urrutia**

**Asesor:
Mg. Reinaldo Rodríguez Cruzado**

Cajamarca – Perú

2018

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi alma mater, Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Escuela Académico profesional de Ingeniería Geológica, a mis docentes quienes con su enseñanza contribuyeron grandemente en mi formación profesional.

Quiero brindar mi más sincero agradecimiento a Dios, mis padres y hermanos, por el apoyo constante e incondicional, han sido pilares fundamentales para alcanzar otra meta más en mi vida.

Un agradecimiento especial a mí asesor el Mg. Reinaldo Rodríguez Cruzado, por el interés mostrado y la constante supervisión durante el desarrollo de la tesis.

C. Rojas U.

DEDICATORIA

A las personas más importantes en mi vida, que siempre están presente para guiarme y brindarme todo su apoyo, con todo mi cariño está tesis se la dedico a mis queridos padres Aurelia y Faustino; hermanos, tíos, primos y amigos, quienes me alientan a seguir adelante y ser un ciudadano de bien.

CMRU

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE FOTOS.....	xiv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.2 BASES TEÓRICAS	5
2.2.1 Clasificación de los Macizos Rocosos.....	5
2.2.2 Criterios de Rotura	11
2.2.3 Análisis de Taludes	16
2.2.4 Métodos del Equilibrio Límite	16
2.2.5 Linealización del Criterio de Rotura de Hoek – Brown.	25
2.2.6 Movimientos de Masas.....	28
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	39
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	41

	Pág.
3.1	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 41
3.1.1	Geográfica 41
3.1.2	Política..... 41
3.2	ACCESIBILIDAD 42
3.3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 42
3.3.1	Tipo y método de la Investigación 42
3.3.2	Población de estudio 42
3.3.3	Muestra 42
3.3.4	Unidad de Análisis..... 43
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS . 43
3.4.1	Técnicas 43
3.4.2	Instrumentos y Materiales 43
3.4.3	Software´s 43
3.5	PROCEDIMIENTO 44
3.5.1	Etapa de gabinete 44
3.5.2	Etapa de campo 44
3.5.3	Etapa final 44
3.6	ESTRATIGRAFÍA..... 45
3.6.1	Grupo Goyllarisquizga (ki – g) 45
3.6.2	Formación Inca (Ki – i) 46
3.6.3	Formación Chulec (Ki – ch) 46
3.6.4	Formación Pariatambo (Ki – pa)..... 47
3.6.5	Grupo Pulluicana (Ks – p)..... 48
3.6.6	Grupo Quilquiñan (Ks – q) 48
3.6.7	Formación Cajamarca (Ks – ca) 49
3.6.8	Depósitos Cuaternarios 50
3.7	GEOMORFOLOGÍA 52
3.7.1	Unidades Morfogénicas (UM) 52
3.7.2	Planicies 53
3.7.3	Lomadas..... 54
3.7.4	Laderas 55
3.7.5	Escarpas 56

	Pág.
3.8	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 57
3.8.1	Estructuras Primarias 57
3.8.2	Estructuras Secundarias Tectónicas 58
3.9	GEOTÉCNIA 63
3.9.1	TRAMO CRÍTICO 01 – PROGRESIVAS Km 141+575 - Km 141+625 69
3.9.2	TRAMO CRÍTICO 02 – PROGRESIVAS Km 141+424 - Km 141+474 81
3.9.3	TRAMO CRÍTICO 03 – PROGRESIVAS Km 140+744 - Km 140+794 93
3.9.4	TRAMO CRÍTICO 04 – PROGRESIVAS Km 139+863 - Km 139+913 106
3.9.5	TRAMO CRÍTICO 05 – PROGRESIVAS Km 139+504 - Km 139+554 118
3.9.6	TRAMO CRÍTICO 06 – PROGRESIVAS Km 138+303 - Km 138+353 131
3.9.7	TRAMO CRÍTICO 07 – PROGRESIVAS Km 136+163 - Km 136+213 144
3.9.8	TRAMO CRÍTICO 08 – PROGRESIVAS Km 135+875 - Km 135+925 154

CAPÍTULO IV

	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....163
4.1	RESULTADOS 166
4.1.1	ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO – CINEMÁTICO..... 168
4.1.2	ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE 169
4.2	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS 173

CAPÍTULO V

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 174
5.1	CONCLUSIONES..... 174
5.2	RECOMENDACIONES 176
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 177

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
<i>Tabla 2.1</i>	Índice de Calidad de la Roca en función al RQD	6
<i>Tabla 2.2</i>	Parámetros de valores para la clasificación RMR89.....	7
<i>Tabla 2.3</i>	Calidad del Macizo Rocoso en función al RMR89	8
<i>Tabla 2.4</i>	Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek y Brown.....	15
<i>Tabla 2.5</i>	Métodos para analizar estabilidad de taludes.	21
<i>Tabla 3.1</i>	Coordenadas UTM - WGS84 del tramo de investigación.....	41
<i>Tabla 3.2</i>	Acceso al área de investigación.....	42
<i>Tabla 3.3</i>	Clasificación para Unidades Morfogenéticas.	53
<i>Tabla 3.4</i>	Unidades Morfogenéticas del área de Investigación.....	57
<i>Tabla 3.5</i>	Descripción de escenarios para análisis de taludes.....	68
<i>Tabla 3.6</i>	Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 01.....	70
<i>Tabla 3.7</i>	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 01.....	71
<i>Tabla 3.8</i>	Estimación del GSI del talud crítico 01.....	72
<i>Tabla 3.9</i>	Propiedades geomecánicas del talud crítico 01.	72
<i>Tabla 3.10</i>	Caracterización del macizo rocoso y orientación del. talud crítico 02.....	82
<i>Tabla 3.11</i>	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 02.....	83
<i>Tabla 3.12</i>	Estimación del GSI del talud crítico 02.....	84
<i>Tabla 3.13</i>	Propiedades geomecánicas del talud crítico 02.	84
<i>Tabla 3.14</i>	Caracterización del macizo rocoso y orientación del. talud crítico 03.....	94
<i>Tabla 3.15</i>	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 03.....	95
<i>Tabla 3.16</i>	Estimación del GSI del talud crítico 03.....	96
<i>Tabla 3.17</i>	Propiedades geomecánicas del talud crítico 03.	96
<i>Tabla 3.18</i>	Caracterización del macizo rocoso y orientación del	

	Pág.
	talud crítico 04.....107
Tabla 3.19	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 04.....108
Tabla 3.20	Estimación del GSI para el talud crítico 04..... 109
Tabla 3.21	Propiedades geomecánicas del talud crítico 04. 109
Tabla 3.22	Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 05..... 119
Tabla 3.23	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 05.....120
Tabla 3.24	Estimación del GSI para el talud crítico 05..... 121
Tabla 3.25	Propiedades geomecánicas del talud crítico 05. 121
Tabla 3.26	Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 06.....132
Tabla 3.27	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 06.....133
Tabla 3.28	Estimación del GSI para el talud crítico 06..... 134
Tabla 3.29	Propiedades geomecánicas del talud crítico 06. 134
Tabla 3.30	Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 07.....145
Tabla 3.31	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 07.....146
Tabla 3.32	Estimación del GSI para el talud crítico 07..... 147
Tabla 3.33	Propiedades geomecánicas del talud crítico 07. 147
Tabla 3.34	Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 08.....155
Tabla 3.35	Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 08.....156
Tabla 3.36	Estimación del GSI para el talud crítico 08..... 157
Tabla 3.37	Propiedades geomecánicas del talud crítico 08. 157
Tabla 4.1	Rangos de Factores de Seguridad, recomendados por Hoek, 2007.....168
Tabla 4.2	Análisis Estereográfico – Cinemático de los taludes

	Pág.
críticos.....	169
Tabla 4.3 Análisis de perfiles de los taludes críticos.....	172

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 2.1</i> GSI para macizos rocosos homogéneos (Hoek y Marinos, 2000).....	9
<i>Figura 2.2</i> Cuantificación GSI mediante las Condiciones de las Discontinuidades y el RQD. Fuente: Hoek et al, 2013.....	10
<i>Figura 2.3</i> Envoltentes de Mohr - Coulomb.	12
<i>Figura 2.4</i> Envoltentes de rotura del criterio de Hoek y Brown.....	13
<i>Figura 2.5</i> Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suárez, 2007).....	16
<i>Figura 2.6</i> Esquema del Método Equilibrio Límite. (Paredes, 2010)	19
<i>Figura 2.7</i> Representación de las fuerzas en el método de Bishop simplificado.....	22
<i>Figura 2.8</i> Representación de las fuerzas en el método de Spencer y Morgenstern-Price.....	23
<i>Figura 2.9</i> Método de Equivalencias de Áreas.....	27
<i>Figura 2.10</i> Formas de movimiento para caídas de rocas. Modificado de (Hoek, 2000).....	29
<i>Figura 2.11</i> Condiciones para Rotura en Cuña (González de Vallejo, 2002).....	30
<i>Figura 2.12</i> a) Condición estructural en una Rotura en Cuña. (b) Representación estereográfica. (Herrera, 2000).....	31
<i>Figura 2.13</i> Criterio cinemático por áreas de sombras.....	32
<i>Figura 2.14</i> Criterio de análisis de cuña directa e inversa.....	33
<i>Figura 2.15</i> Condiciones para Rotura Planar. (González de Vallejo, 2002). ...	34
<i>Figura 2.16</i> a) Condición estructural de una Rotura Planar. b) representación estereográfica.(Herrera, 2000).....	35
<i>Figura 2.17</i> Mecanismos de vuelco (Corominas y García Yagüe, 1997).	36
<i>Figura 2.18</i> (a) Condición estructural para toppling. (b) Representación estereográfica.(Herrera, 2000).....	38
<i>Figura 3.1</i> Representación del anticlinal con ángulo de plunge de 21°, una dirección de charnela NW-SE.....	60

	Pág.
<i>Figura 3.2</i> Cálculo del coeficiente sísmico horizontal y vertical, mediante el Software Loadcap de Geostru.....	65
<i>Figura 3.3</i> Mapa de zonas sísmicas del Perú (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016).....	66
<i>Figura 3.4</i> Promedio de precipitación y temperatura de Chota (SENAMHI, 2017).....	67
<i>Figura 3.5</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Cajamarca.....	73
<i>Figura 3.6</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.....	74
<i>Figura 3.7</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.....	75
<i>Figura 3.8</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.....	76
<i>Figura 3.9</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.....	77
<i>Figura 3.10</i> Análisis Slide en condiciones naturales	78
<i>Figura 3.11</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	78
<i>Figura 3.12</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	79
<i>Figura 3.13</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad	79
<i>Figura 3.14</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	80
<i>Figura 3.15</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Cajamarca.....	85
<i>Figura 3.16</i> Análisis cinemático en el diagrama de polos y círculos máximos, mediante áreas de sombras, indican rotura en cuña.....	86

	Pág.
<i>Figura 3.17</i> Análisis cinemático en el diagrama de polos y círculos máximos, mediante áreas de sombras indican rotura planar.....	87
<i>Figura 3.18</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.....	88
<i>Figura 3.19</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.....	89
<i>Figura 3.20</i> Análisis Slide en condiciones naturales.	90
<i>Figura 3.21</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	90
<i>Figura 3.22</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	91
<i>Figura 3.23</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	91
<i>Figura 3.24</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	92
<i>Figura 3.25</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Cajamarca.....	97
<i>Figura 3.26</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican de rotura planar.....	98
<i>Figura 3.27</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras en el diagrama de polos y círculos máximos, indican de rotura en cuña.....	99
<i>Figura 3.28</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.....	100
<i>Figura 3.29</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.....	101

	Pág.
<i>Figura 3.30</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de volcamiento flexural.....	102
<i>Figura 3.31</i> Análisis Slide en condiciones naturales.	103
<i>Figura 3.32</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	103
<i>Figura 3.33</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	104
<i>Figura 3.34</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	104
<i>Figura 3.35</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	105
<i>Figura 3.36</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas del Grupo Quilquiñan.....	110
<i>Figura 3.37</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.....	111
<i>Figura 3.38</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.....	112
<i>Figura 3.39</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.....	113
<i>Figura 3.40</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.....	114
<i>Figura 3.41</i> Análisis Slide en condiciones normales.	115
<i>Figura 3.42</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	115
<i>Figura 3.43</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	116
<i>Figura 3.44</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	116
<i>Figura 3.45</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	117

	Pág.
<i>Figura 3.46</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas del Grupo Pulluicana.....	122
<i>Figura 3.47</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.....	123
<i>Figura 3.48</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.....	124
<i>Figura 3.49</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.....	125
<i>Figura 3.50</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.....	126
<i>Figura 3.51</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de volcamiento flexural.....	127
<i>Figura 3.52</i> Análisis Slide en condiciones naturales.	128
<i>Figura 3.53</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	128
<i>Figura 3.54</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	129
<i>Figura 3.55</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	129
<i>Figura 3.56</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	130
<i>Figura 3.57</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Pariatambo.....	135
<i>Figura 3.58</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.....	136
<i>Figura 3.59</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.....	137

	Pág.
<i>Figura 3.60</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimiento de cuña directa.....	138
<i>Figura 3.61</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.....	139
<i>Figura 3.62</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de volcamiento directo.....	140
<i>Figura 3.63</i> Análisis Slide en condiciones de naturales.	141
<i>Figura 3.64</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	141
<i>Figura 3.65</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	142
<i>Figura 3.66</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	142
<i>Figura 3.67</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	143
<i>Figura 3.68</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Chulec.....	148
<i>Figura 3.69</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.....	149
<i>Figura 3.70</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.....	150
<i>Figura 3.71</i> Análisis Slide en condiciones normales.	151
<i>Figura 3.72</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	151
<i>Figura 3.73</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	152
<i>Figura 3.74</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	152
<i>Figura 3.75</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	153

	Pág.
<i>Figura 3.76</i> Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Pariatambo.....	158
<i>Figura 3.77</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.....	159
<i>Figura 3.78</i> Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.....	160
<i>Figura 3.79</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.....	161
<i>Figura 3.80</i> Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimiento de cuña directa.....	162
<i>Figura 3.81</i> Análisis Slide en estado natural.	163
<i>Figura 3.82</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	163
<i>Figura 3.83</i> Análisis Slide en condiciones de saturación total.....	164
<i>Figura 3.84</i> Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	164
<i>Figura 3.85</i> Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.....	165

ÍNDICE DE FOTOS

		Pág.
<i>Foto 3.1</i>	Areniscas del Grupo Goyllarisquizga.	45
<i>Foto 3.2</i>	Formación Inca.	46
<i>Foto 3.3</i>	Calizas nodulares de la Formación Chulec.	47
<i>Foto 3.4</i>	Calizas bituminosas de la Formación Pariatambo.	47
<i>Foto 3.5</i>	Calizas grisáceas del Grupo Pulluicana.	48
<i>Foto 3.6</i>	Afloramiento de la Formación Quilquiñan.	49
<i>Foto 3.7</i>	Contacto litológico (Ks- ca / (Ks- q).	49
<i>Foto 3.8</i>	Calizas bien estratificadas de la Formación Cajamarca.	50
<i>Foto 3.9</i>	Depósitos Aluviales en el área de investigación.	51
<i>Foto 3.10</i>	Depósitos Coluviales en el margen izquierdo del río Chotano. ...	51
<i>Foto 3.11</i>	Depósitos fluviales en el río Chotano, compuesto por gravas limos y arcillas.	52
<i>Foto 3.12</i>	Planicie ubicada al margen izquierdo del río Chotano.	54
<i>Foto 3.13</i>	Lomadas en el margen derecho del río Chotano, con ligera vegetación. Coordenadas: E 749308, N 9274874, Cota 2143 m.s.n.m.	55
<i>Foto 3.14</i>	Laderas en la Formación Cajamarca, margen izquierdo del río Chotano. Coordenadas: E 749470, N 9274608, Cota 2146 m.s.n.m.	55
<i>Foto 3.15</i>	Escarpas que no generan deslizamiento debido a que su dirección de buzamiento es en contra de la dirección del talud.	56
<i>Foto 3.16</i>	Estratos de la Formación Cajamarca.	58
<i>Foto 3.17</i>	Anticlinal en el área de investigación.	59
<i>Foto 3.18</i>	Estratificación y Pliegues en la Formación Chulec.	61
<i>Foto 3.19</i>	Diaclasas con orientación: 01: N114° y Buz 60°, 02: N235° y Buz 88°	62
<i>Foto 3.20</i>	Falla en el área de investigación.	63
<i>Foto 3.21</i>	Afloramiento de calizas packstone gris oscuras en las	

	Pág.
	progresivas Km 141+575 - Km 141+625.....69
<i>Foto 3.22</i>	Perfil del talud en la progresiva Km 141+575.....70
<i>Foto 3.23</i>	Afloramiento de calizas gris claras en las progresivas Km 141+424 - Km 141+474.....-.....81
<i>Foto 3.24</i>	Perfil del talud en la progresiva Km 141+424..... 82
<i>Foto 3.25</i>	Afloramiento de calizas gris oscuras en las progresivas Km 140+744 - Km 140+794, de bloques irregulares...-.....93
<i>Foto 3.26</i>	Perfil del talud en la progresiva Km 140+744..... 94
<i>Foto 3.27</i>	Afloramiento de calizas gris amarillentas en la progresiva Km 139+863 - Km 139+913.....106
<i>Foto 3.28</i>	Perfil del talud en la progresiva Km 139+863..... 107
<i>Foto 3.29</i>	Afloramiento de calizas gris blanquecinas en la progresiva Km 139+504 - Km 139+554.....118
<i>Foto 3.30</i>	Perfil del talud en la progresiva Km 139+504..... 119
<i>Foto 3.31</i>	Afloramiento de calizas bituminosas en la progresiva Km 137+303 - Km 137+353.....131
<i>Foto 3.32</i>	Perfil del talud en el Km 137+303. 132
<i>Foto 3.33</i>	Afloramiento de calizas arenosas en la progresiva Km 135+163 - Km 135+213.....144
<i>Foto 3.34</i>	Perfil del talud en la progresiva Km 135+163..... 145
<i>Foto 3.35</i>	Afloramiento de calizas compactas en la progresiva Km 134+875 - Km 134+925.....154
<i>Foto 3.36</i>	Perfil del talud en la progresiva Km 134+875..... 155

RESUMEN

La investigación determina el comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas – El Tayal, que corresponde a las progresivas km 141+700 - km 134+450 respectivamente. Dicha carretera corta la Formación Carhuaz del Grupo Goyllarisquizga, Formaciones del Cretácico Superior: Inca, Chulec, Pariatambo, Grupo Pulluicana, Grupo Quilquiñan, Formación Cajamarca, depósitos cuaternarios tipo aluvial, fluvial y coluvial. Los taludes constituidos son macizos rocosos que presentan inestabilidad geotécnica por fuerte fracturamiento, originado por la geotectónica regional-local, así como por la meteorización superficial y en profundidad que condicionan su morfología; variables desencadenantes como la precipitación y la sismicidad; condicionantes que determinan deslizamientos-desprendimientos de rocas. Se realizaron ocho secciones transversales al eje de carretera, para lo cual las teorías empleadas fueron: Sistema de Valoración del Macizo Rocosos (RMR), Índice de Calidad de la Roca (RQD) e Índice de Resistencia Geológica (GSI) que permitieron integrar todas las variables geoestructurales en un modelo cinemático de cada sección, utilizando Software Dips se definió rotura en cuña, planar y volcamientos. Utilizando parámetros geomecánicos de Software RocData, nivel freático y sismicidad, mediante Software Slide se obtuvo factores de seguridad: En estado de saturación total son inestables excepto el talud 03 con $FS=1.373$, en estado de saturación parcial son inestables los taludes 04 con $FS=0.808$, talud 07 con $FS=0.964$, en estado de saturación parcial más sismicidad son inestables los taludes 04 con $FS=0.815$, 06 con $FS=0.912$ y 07 con $FS=0.736$.

Palabras claves: Talud, Geomecánica, Factor de Seguridad, Inestabilidad.

ABSTRACT

The investigation determines the geotechnical behavior of the critical slopes of the Lajas - El Tayal highway, which corresponds to the progressive km 141 + 700 - km 134 + 450 respectively. This road cuts the Carhuaz Formation of the Goyllarisquizga Group, Formations of the Upper Cretaceous: Inca, Chulec, Pariatambo, Pulluicana Group, Quilquiñan Group, Cajamarca Formation, alluvial, fluvial and colluvial type Quaternary deposits. The formed slopes are rocky massifs that present geotechnical instability due to strong fracturing, originated by the regional-local geotectonics, as well as by the superficial and deep weathering that condition their morphology; triggering variables such as precipitation and seismicity; conditions that determine landslides-rockfalls. Eight cross sections were made to the road axis, for which the theories used were: Rocky Mass Assessment System (RMR), Rock Quality Index (RQD) and Geological Resistance Index (GSI) that allowed to integrate all the Geostructural variables in a kinematic model of each section, using Software Dips was defined break in wedge, planar and caps. Using Geomechanical parameters of RocData Software, phreatic level and seismicity, by Slide Software, safety factors were obtained: In a state of total saturation they are unstable except slope 03 with FS = 1.373, in a state of partial saturation the slopes 04 are unstable with FS = 0.808, slope 07 with FS = 0.964, in a state of partial saturation plus seismicity the slopes 04 are unstable with FS = 0.815, 06 with FS = 0.912 and 07 with FS = 0.736.

Keywords: Slope, Geomechanics, Safety Factor, Instability.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de taludes en carreteras constituye un problema principal desde el punto de vista de seguridad y económico. Determinar del comportamiento geotécnico mediante modelos de cálculo numérico aplicando los conceptos de cinemática y de equilibrio límite como métodos de cálculo de los deslizamientos y desprendimientos de macizos rocosos es de suma importancia, ya que el buen conocimiento del comportamiento de un talud frente a sus posibles fallas repercute en costes.

El área de investigación comprende los taludes críticos ubicados en la carretera Lajas – El Tayal, donde se evidencia problemas de inestabilidad geotécnica debido al intenso fracturamiento de las rocas calizas. La saturación de los macizos rocosos están afectados por la infiltración debido a las precipitaciones y la probabilidad sísmica, determinando el comportamiento geotécnico de las rocas, lo cual incide en los factores de seguridad que a su vez determina las zonas críticas.

Es por ello que se genera la incógnita: ¿Existe relación de inestabilidad geotécnica entre los macizos rocosos, las litomorfoestructuras y las variables detonantes de infiltración y sismicidad en los taludes críticos de la carretera Lajas – El Tayal?, el desarrollo y éxito de la investigación gira en torno a comprobar una respuesta anticipada, la cual se estructura de la siguiente manera: El comportamiento geotécnico de los taludes críticos en los macizos rocosos de la carretera Lajas – El Tayal está en condiciones inestables y dependen de las características litomorfoestructurales y las variables detonantes de infiltración y sismicidad.

Los desprendimientos y deslizamientos de rocas en la carretera Lajas – El Tayal representan un peligro constante para la transitabilidad por dicha vía, es por ello que se realizará una investigación geotécnica, considerando las litomorfoestructuras, hidrología y sismicidad, lo cual determinará la inestabilidad de los taludes en los macizos rocosos, ya que es necesario conocer el comportamiento geomecánico para posibles mejoras evitando cualquier peligro a la infraestructura económica y daños personales.

Con esta investigación se busca determinar el comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas – El Tayal, siendo de tipo descriptivo, correlacional y explicativo. El objetivo general de la investigación es: Determinar el comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas – El Tayal, en la provincia de Chota. Basados en fines de veracidad y realce de la investigación los objetivos específicos son: Cartografiado geológico del área de investigación, Analizar el comportamiento litomorfoestructural, Determinar las propiedades geomecánicas de los taludes críticos, Definir el comportamiento geotécnico de los taludes críticos, Calcular los Factores de Seguridad de los taludes críticos mediante el software Slide v.6, Zonificar los taludes críticos. No obstante, cabe resaltar que tras la elaboración del presente trabajo de investigación, existieron algunas limitaciones, que de alguna u otra manera dificultaron el desarrollo de la misma, entre ellas tenemos: Recursos económicos para realizar ensayos de compresión triaxial e Impedimentos relativos para el ingreso al área de investigación.

La investigación se organizó en cinco Capítulos donde se incluye sus respectivos ítems, como figura en el índice de contenido.

En el capítulo I, se describe el planteamiento y formulación del problema, justificación, delimitación, limitaciones, objetivos e hipótesis de la investigación.

El capítulo II, contiene el marco teórico de esta investigación; bases teóricas de algunos autores con sus respectivos libros u obras; definición de términos

básicos, con la finalidad de establecer una relación con cada una de ellas, sirviendo de base y sostenimiento de dicha investigación.

El capítulo III, está constituido por la descripción de los materiales y métodos que se utilizó en esta investigación: ubicación geográfica, accesibilidad, metodología, técnicas e instrumentos de recolección de datos y la descripción del procedimiento y procesamiento de la información, para finalizar con el contexto geológico; dentro del cual ubicamos la geología, litología, geomorfología, geología estructural y geotecnia con sus respectivos taludes críticos.

En el capítulo IV, se presenta el análisis y discusión de resultados, donde se hizo el análisis de la información y presentación de los resultados obtenidos, por ultimo contiene la contratación de la hipótesis, determinando así la veracidad de la misma.

El capítulo V, muestra las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los estudios a nivel regional y local son realizados en gran parte por el área de Geología y la institución formadora representante INGEMMET; la cual brinda información de años anteriores y recientes; para el mejor análisis e interpretación de áreas de investigación.

Wilson, J. 1984. Realizó para el INGEMMET el estudio geológico de los cuadrángulos de Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepén (15-e). Estudió la estratigrafía y la geología estructural a escala 1:100 000.

Mercado, A. 2014. Realizó el estudio “Análisis de inestabilidad de taludes en zonas críticas en la carretera Cajamarca – Celendín en el tramo km. 52+000 - km 94+400”. En dicha tesis se evalúa zonas críticas, teniendo en cuenta características litológicas, geomorfológicas y estructurales. Analiza también los factores de seguridad. Concluye que el principal agente de erosión es el agua, la cual favorece la cinemática de los macizos rocosos mediante la infiltración en las Formaciones Pariatambo, Cajamarca y el Grupo Quilquiñan.

Montoya, FR. 2014. Realizó el estudio “Evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán”. En esta tesis se determinó el comportamiento litomorfoestructural, la identificación de los factores que propician la inestabilidad.

Sáenz, EJ. 2015. Realizo el estudio: “Evaluación geotécnica de los taludes en el tramo de carretera El Gavilán – Chigden”. En dicha tesis se evalúa las zonas críticas en el tramo de carretera km 150+860 – km 162+000, analiza los factores de seguridad en 04 estaciones geotécnicas, rocas pertenecientes al grupo Goyllarisquizga y depósitos cuaternarios aluviales. Concluye que La inestabilidad en los taludes son generados por los vehículos pesados que crea vibraciones, las precipitaciones, la infiltración y los fuertes cambios de temperatura.

Rodrigo, LR. 2017. Realizó el estudio “Análisis de estabilidad de taludes en la carretera Lajas – Ajjipampa”. Esta tesis corresponde a las progresivas Km 141+500 y Km 138+250 de la carretera Chota – Chongoyape en cual analiza la estabilidad de los taludes en depósitos cuaternarios y en las Formaciones Pariatambo, Quilquiñan – Mujarrún, Pulluicana y Cajamarca. El análisis del Factor de Seguridad lo realizó mediante el Software Slide y RocPlane y, concluye que en estado de saturación y sismicidad, los taludes de macizo rocoso son estables y suelos – macizos rocosos son inestables, además realiza una zonificación y propone medidas de estabilización.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Clasificación de los Macizos Rocosos

Las clasificaciones de los macizos rocosos se basan en factores que determinan su comportamiento geomecánico:

- Propiedades de la matriz rocosa.
- Frecuencia y tipo de las discontinuidades, que definen el grado de fracturamiento, el tamaño y la forma de los bloques del macizo además de sus propiedades hidrogeológicas.
- Grado de meteorización o alteración.
- Estado de tensiones insitu.

- Presencia de agua.

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas para investigaciones en taludes son: Índice de Calidad de la Roca (RQD: Rock Quality Designation), Sistema de Valoración del Macizo Rocoso (RMR: Rock Mass Rating) e Índice de Resistencia Geológica (GSI: Geological Strength Index).

➤ **Índice de Calidad de la Roca (RQD: Rock Quality Designation – Deere 1967)**

Para determinar el RQD en una línea de muestreo, se puede obtener el promedio del espaciado de las discontinuidades (número de discontinuidades dividida para la longitud de la línea de muestreo), (Gavilanes y Andrade, 2004). Se calcula mediante la ecuación:

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

Dónde: $\lambda = N^{\circ}$ De Discontinuidades/Longitud

Tabla 2.1: Índice de Calidad de la Roca en función al RQD

RQD (%)	CALIDAD DE LA ROCA
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

Fuente: Gonzáles de Vallejo, 2004

➤ **Sistema de Valoración del Macizo Rocoso, Bieniawski 1989. (RMR₈₉: Rock Mass Rating)**

Los siguientes parámetros son usados para clasificar un macizo rocoso utilizando el sistema RMR₈₉:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca.

- Índice de Calidad de la Roca (RQD).
- Espaciado entre discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Condición de infiltraciones de agua.

Tabla 2.2: Parámetros de valores para la clasificación RMR_{89} .

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES						
1	Resistencia de la Roca Intacta	Ensayo Carga Puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Compresión simple (MPa)	
		Compresión Simple	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa 1 - 5 MPa < 1 MPa	
		VALOR	15	12	7	4	2 1 0	
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %	
		VALOR	20	17	12	8	3	
3	Espaciado de las Discontinuidades		> 2m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	6 - 20 cm	< 6 cm	
		VALOR	20	15	10	8	5	
4	Estado de las Discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	
			VALOR	6	4	2	1	0
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	
			VALOR	6	5	4	1	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave	
			VALOR	6	5	3	1	0
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5 mm	Relleno Duro > 5 mm	Relleno Blando < 5 mm	Relleno Blando > 5 mm	
			VALOR	6	4	2	2	0
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta	
	VALOR	6	5	3	1	0		
	VALOR	30	23	13	6	0		
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación Presión agua/ Tensión Principal Mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente Húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
		VALOR	15	10	7	4	0	

Fuente: Bieniawski, 1989.

Tabla 2.3: Calidad del Macizo Rocoso en función al RMR_{89}

CLASE	CALIDAD	CALIDAD DE LA ROCA
I	Muy buena	81 - 100
II	Buena	61 – 80
III	Media	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy mala	< 20

Fuente: Bieniawski, 1989.

➤ **Índice de Resistencia Geológica (GSI : Geological Strength Index)**

Desarrollado por Hoek y Brown, 1997; Posteriormente, Hoek y Marinos, 2000. Mejoraron e indicaron que el GSI evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado de fracturamiento, condiciones de meteorización y las características de la estructura geológica, tamaño de bloques y alteración de las discontinuidades. El GSI proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas y se obtiene de la combinación de 02 parámetros geológicos fundamentales, la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades.

Además es posible establecer una relación del GSI con el RMR_{89} mediante la ecuación constitutiva, como se muestra a continuación:

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

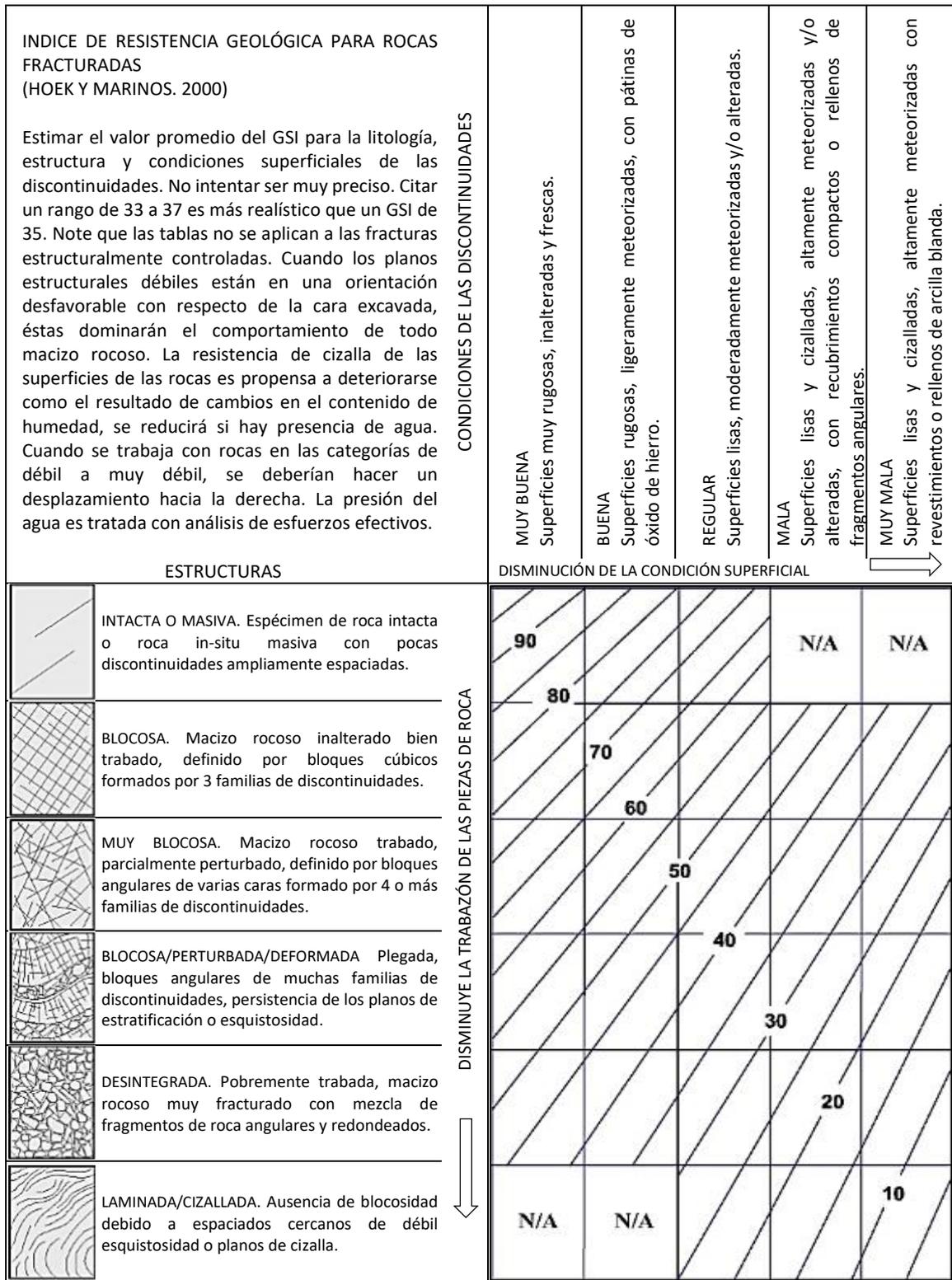


Figura 2.1: GSI para macizos rocosos homogéneos. (Hoek y Marinos, 2000).

González de Vallejo, L. 2004. Menciona que el GSI se basa en estimaciones cualitativas, y en modelos simples, que rara vez coinciden con las condiciones

reales y que las observaciones debían ser realizadas por geólogos o ingenieros geólogos cuantificadores. Es por lo ello que Hoek, E; Carter, T; Diederichs, M. 2013, presentan una “Cuantificación de la tabla GSI sobre la base de dos parámetros bien establecidos, las condiciones de las discontinuidades y el RQD”.

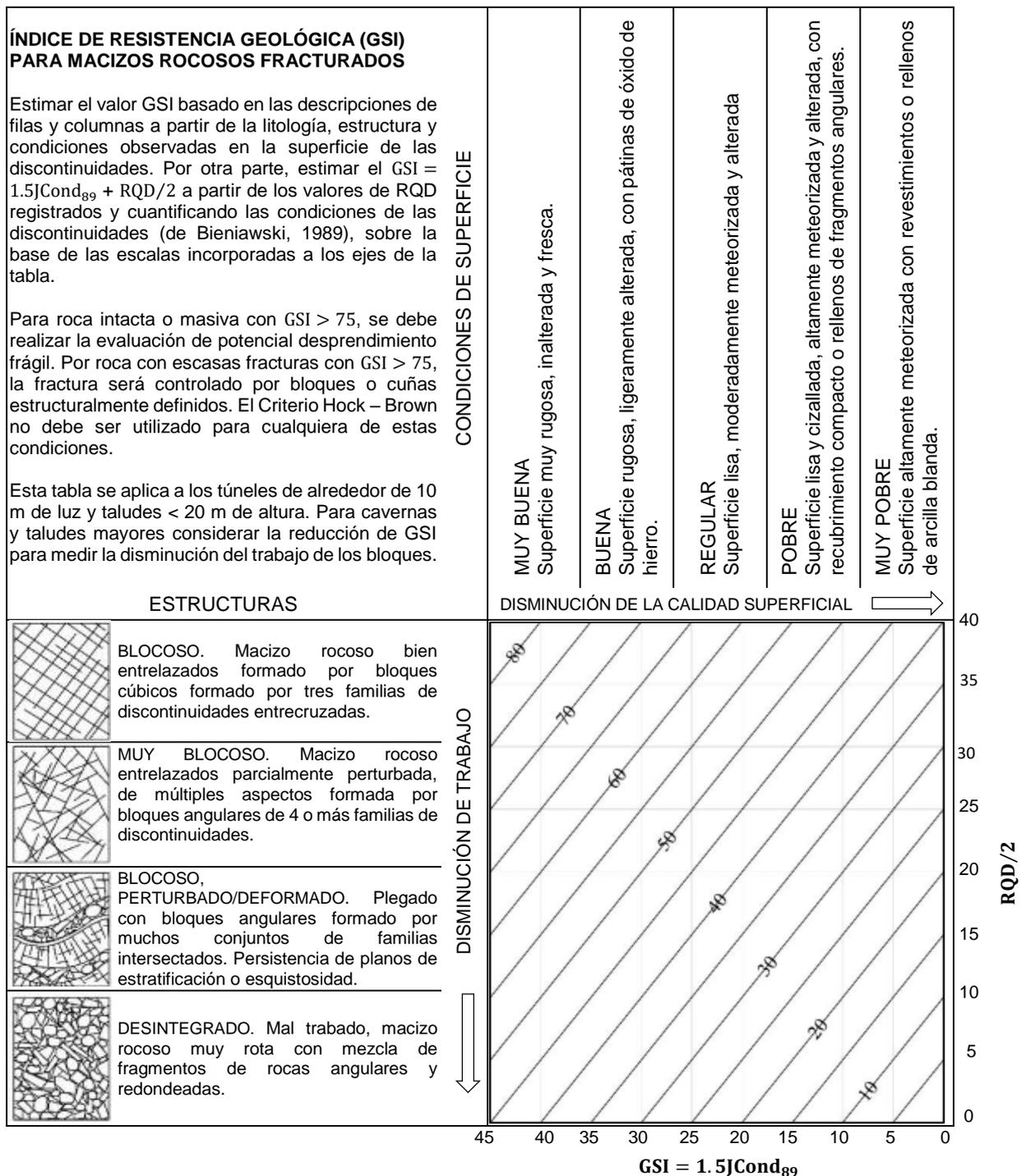


Figura 2.2: Cuantificación GSI mediante las condiciones de las discontinuidades y el RQD. (Hoek et al, 2013).

2.2.2 Criterios de Rotura

➤ Criterio de Rotura de Mohr – Coulomb

Esto se necesita como parte del criterio de rotura de Hoek y Brown, que los valores que se encuentran de Hoek y Brown mediante el criterio de rotura de Mohr – Coulomb, son los parámetros c y ϕ equivalentes.

El criterio de rotura Mohr – Coulomb, inicialmente pensado para el estudio en suelos, siendo un criterio lineal. Esto significa que la ecuación que define la superficie de fluencia es una línea recta, definiéndose la rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. Como se muestra en la ecuación.

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

Dónde:

c' = Cohesión efectiva.

ϕ' = Ángulo de rozamiento interno efectivo.

τ = Tensión tangencial.

σ' = Tensión normal que actúa en el plano de rotura.

El criterio puede expresarse igualmente en función de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 :

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3 [\sin 2\theta + \tan \phi \cos(1 - \cos 2\theta)]}{\sin 2\theta - \tan \phi \cos(1 + \cos 2\theta)}$$

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

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi + \sigma_3 [1 + \sin \phi]}{(1 - \sin \phi)}$$

Si se da la condición $\sigma_3 = 0$, σ_1 será la resistencia a la compresión simple de la roca:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

El criterio también proporciona el valor de la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi}$$

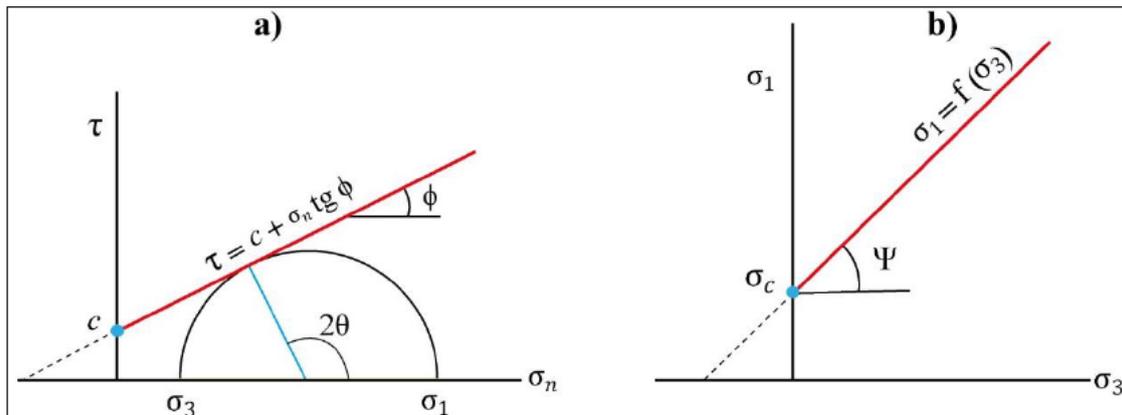


Figura 2.3: Envolturas de Mohr - Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales (a) y esfuerzos principales (b). Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envolturas no se producirá la rotura.

➤ Criterio de Rotura de Hoek – Brown

Para evaluar la resistencia de la matriz rocosa es más adecuado un criterio no lineal, donde la representación gráfica de la rotura es una curva de tipo cóncavo. Lo propuesto por Hoek – Brown (1980), es un criterio empírico de rotura no lineal válido para evaluar la resistencia de la matriz rocosa isótropa en condiciones triaxiales:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2}$$

Donde $(\sigma_1$ y $\sigma_3)$ son los esfuerzos principales mayor y menor en rotura, σ_{ci} es la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa y m_i es una constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa.

Con la finalidad de ampliar el rango de aplicación del *Criterio de Hoek y Brown Generalizado*, los valores del macizo rocosos se obtienen de:

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

– 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 dadas por las siguientes relaciones:

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

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

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

Tabla 2.4: Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek y Brown.

Apariencia del Macizo Rocoso	Descripción del Macizo Rocoso	Valor D Sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.</p>	<p>D=0</p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante</p> <p>Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance. La alteración puede ser severa a menos que se coloquen una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la figura.</p>	<p>D=0</p> <p>D=0.5 No invert</p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 metros en el macizo rocoso circundante.</p>	<p>D=0.8</p>
	<p>Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil y geotécnica dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la alteración de tensión resulta en alguna alteración.</p>	<p>D=0.7 Good blasting</p> <p>D=1.0 Poor blasting</p>
	<p>Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al resistir el estéril de recubrimiento</p> <p>En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.</p>	<p>D=1.0 Production blasting</p> <p>D=0.7 Mechanical excavation</p>

Fuente: Hoek et al., 2002.

2.2.3 Análisis de Taludes

Los análisis se aplican al diseño de taludes cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir el coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar la rotura,(González de Vallejo, 2004).

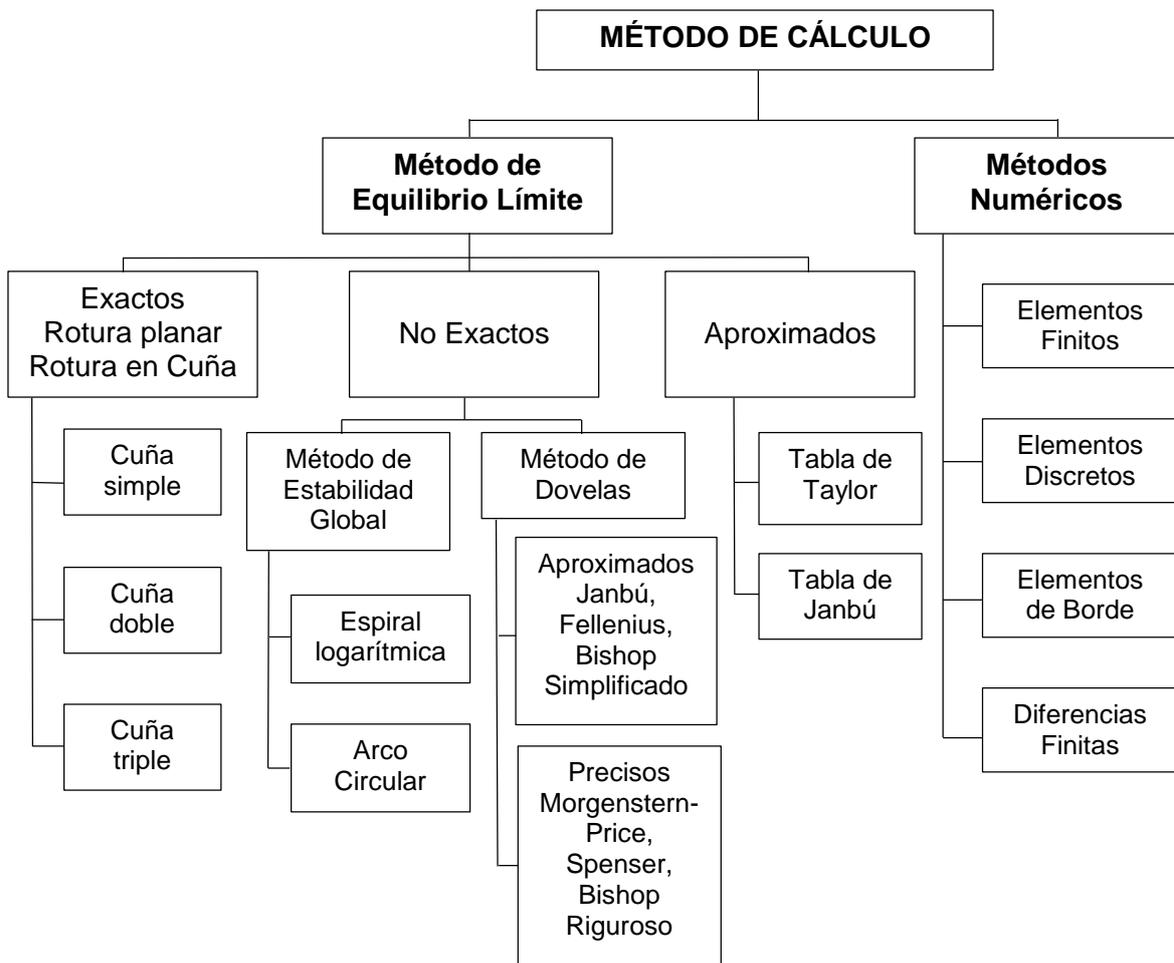


Figura 2.5: Métodos de análisis de estabilidad de taludes. (Suárez, 2007).

2.2.4 Métodos del Equilibrio Límite

Los métodos de equilibrio límite analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al

movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basan en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Mohr – Coulomb.
- La definición de coeficiente de seguridad.

Los problemas de inestabilidad son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Así mismo se asumen las siguientes condiciones:

- La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento o desprendimiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos como peso específico del material, presión de agua.
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

Con estas condiciones se establecen las ecuaciones del equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento o desprendimiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del coeficiente de seguridad del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan. Es decir, el coeficiente F por el que deben dividirse las fuerzas tangenciales resistentes (o multiplicarse las fuerzas de corte desestabilizadoras) para alcanzar el equilibrio estricto (González de Vallejo, 2004).

➤ **Método de Dovelas**

El análisis de inestabilidad 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 de Braja M. Das. (1984). Como se muestra en la ecuación:

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

En la mayoría de los métodos con fallas curvas o circulares, la masa de la parte superior de la superficie de falla se divide en una serie de rebanadas verticales. El número de rebanadas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis. Entre mayor sea el número de rebanadas, los resultados serán más precisos. En los procedimientos de análisis con rebanadas, generalmente se considera el equilibrio de momentos con relación al centro del círculo para todas y cada una de las rebanadas.

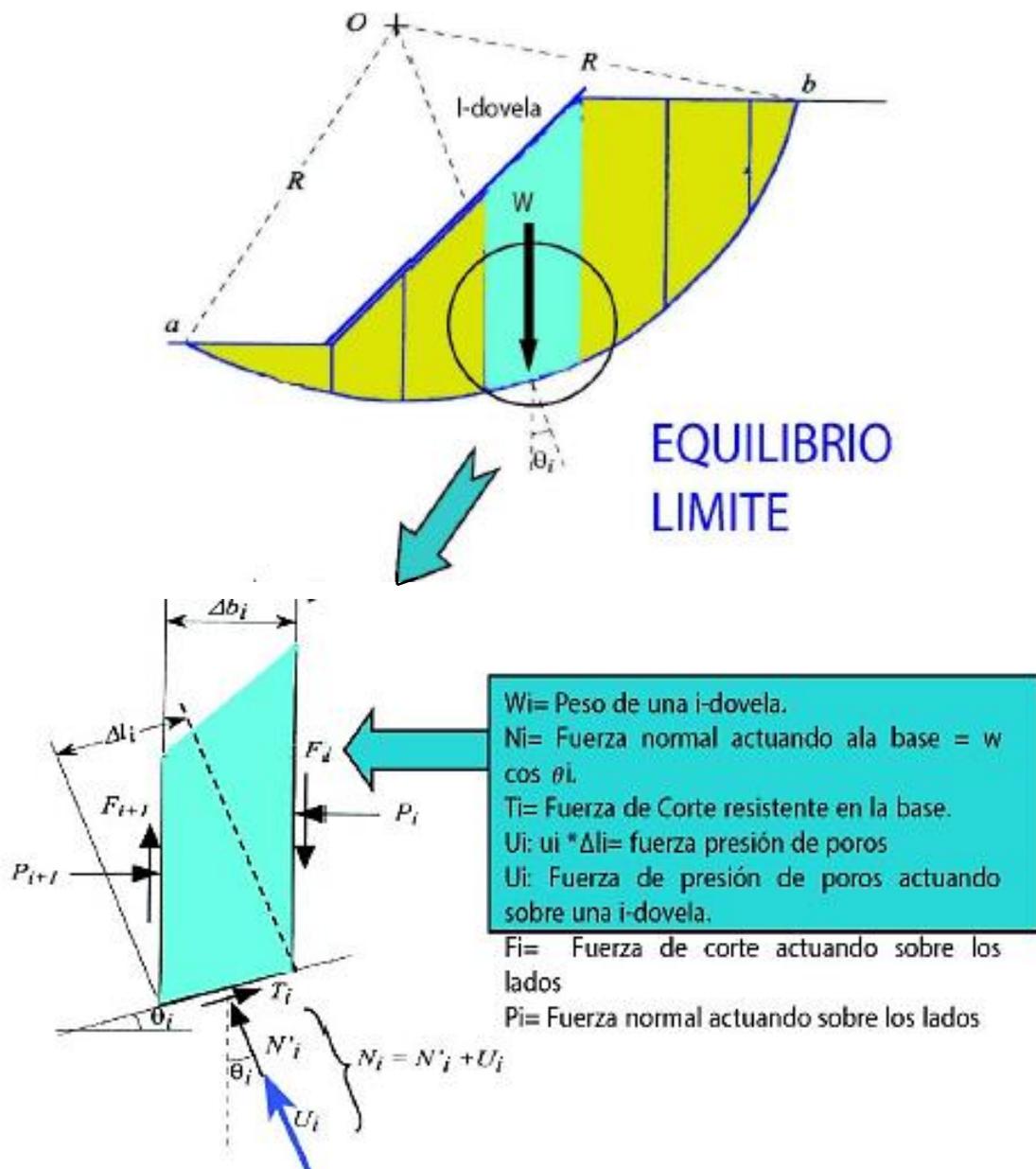


Figura 2.6: Esquema del Método Equilibrio Límite. (Paredes, 2010).

Las fuerzas que actúan sobre cada dovela deben encontrarse en equilibrio, tanto para cada dovela, como para la totalidad de la masa deslizante. Algunos métodos consideran sólo equilibrio de fuerzas, otros sólo de momento y otros satisfacen ambas fuerzas. Las hipótesis del Método de Equilibrio Límite son:

- El material sigue una ley de comportamiento Mohr – Coulomb: $\tau = c + \sigma n'$ $\tan(\phi')$ y la resistencia se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de deslizamiento.

– El Factor de Seguridad (FS) de la componente cohesiva y friccionante del material es igual para todos los materiales en la superficie de deslizamiento y es el mismo para todas las dovelas.

En este sentido, si el número de dovelas o rebanadas es igual a n , el problema presenta las siguientes incógnitas:

- n valores de las fuerzas normales X_i en la base de cada rebanada.
- n valores de las fuerzas de corte en la base de la rebanada X_i
- $(n - 1)$ fuerzas normales E_i en la conexión de las rebanadas.
- $(n - 1)$ fuerzas tangenciales X_i en la conexión de las rebanadas.
- n valores de la coordenada del punto de aplicación de las E_i
- $(n - 1)$ valores de la coordenada del punto de aplicación de las X_i
- una incógnita constituida por el factor de seguridad (F).

En total las incógnitas son: $(6n - 2)$, mientras las ecuaciones a disposición son:

- Ecuaciones de equilibrio de momentos n .
- Ecuaciones de equilibrio en la traslación vertical n .
- Ecuaciones de equilibrio en la traslación horizontal n .
- Ecuaciones del criterio de rotura n .

Total número de ecuaciones $4n$.

El problema es estáticamente indeterminado y el grado de indeterminación es igual a:

$$I = (6n - 2) - 4n = 2n - 2$$

El grado de indeterminación se reduce a $(n - 2)$. Al asumir que N_i se aplica en el punto medio de la franja, esto equivale a crear la hipótesis de que las tensiones normales totales están distribuidas uniformemente. Los diferentes métodos que se basan en la teoría del equilibrio límite se diferencian por el modo en que se eliminan las $(n - 2)$ indeterminaciones.

Tabla 2.5: Métodos para analizar estabilidad de taludes.

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De Fuerzas	No tienen en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisfacen equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizante como para la dovelas individuales, los factores de seguridad son bajos
Bishop Simplificado Bishop 1955	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo en número de incógnitas
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado U.S Army Corps of Engineers 1970	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Asume que todas las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath 1960	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer 1967	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Establece el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida
Morgenstern - Price 1965	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y Fuerzas	El método es similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma 1973	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad
Elementos Finitos	Cualquier forma de superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral Logarítmica	Espiral Logarítmica	Momentos y Fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Fuente: Suárez, 2007.

➤ **Método de Bishop Simplificado (1955)**

Bishop desarrolló en el 1955 un método de rebanadas, el Método de Bishop, con las siguientes hipótesis:

- Se supone una superficie de ruptura circular.
- La masa deslizante se divide en “n” rebanas o bloques verticales.
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo.

- A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se obtienen las fuerzas N (normales a la superficie de ruptura) y se sustituyen a la ecuación resultante del equilibrio de momentos.
- El Método de Bishop Simplificado ignora las tensiones tangenciales entre rebanadas. Por otro lado considera las normales. Figura 2.7.

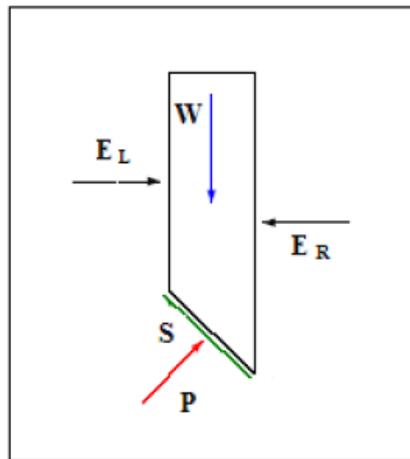


Figura 2.7: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Bishop simplificado.

Donde:

W : Cargas verticales externas.

E_L Y E_R : Fuerzas normales izquierda y derecha entre rebanadas.

P y S : Fuerza normal y tangencial respectivamente a la base de la rebanada

Es necesario realizar varias iteraciones para obtener el valor de FS, y la convergencia acostumbra a determinarse rápidamente.

Una vez que se obtiene el valor del Factor de Seguridad de la superficie considerada, se supone una segunda superficie circular y se determina un nuevo valor de FS; y así sucesivamente hasta obtener un mínimo. Normalmente, las ecuaciones se programan y se analizan círculos con diferentes radios y centros, hasta que se consigue el que proporciona un valor del Factor de Seguridad mínimo.

El método de Bishop puede ser aplicado también a superficies no circulares adoptando un centro de rotación virtual.

Es un método adecuado para los cálculos a mano y obtener la convergencia de forma rápida.

Haciendo equilibrio de momentos al centro del círculo se obtiene la estabilidad global y su Factor de Seguridad F_m . Aunque el problema está sobredeterminado, el equilibrio horizontal no se satisface. Bishop lo analizó y mostró que el Factor de Seguridad no es especialmente sensible al valor de estas fuerzas entre elementos.

➤ **Método de Spencer (1967)**

Inicialmente pensado para el análisis de superficies de rotura circulares, el método de Spencer (1967) puede ser aplicado a superficies no circulares siempre que se adopte uno centro de rotación friccional. En este método se suponen todas las fuerzas entre elementos, donde, W son las cargas verticales externas, E_L y E_R las fuerzas normales izquierda y derecha entre rebanadas; X_L y X_R fuerzas verticales entre rebanadas a izquierda y derecha; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la rebanada. Figura 2.8.

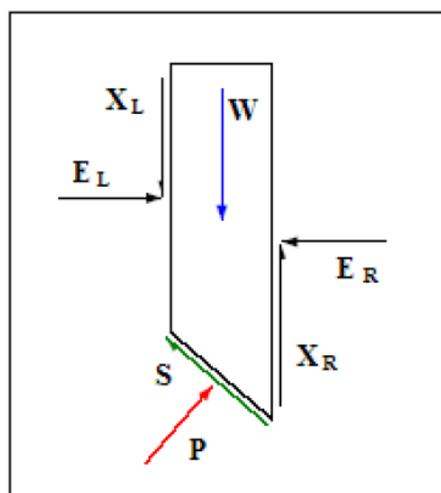


Figura 2.8: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Spencer y Morgenstern-Price.

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

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

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

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

$$\text{dónde } m_i = \cos i \cdot \left(1 + \tan i \cdot \frac{\tan \varphi'}{F} \right)$$

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

Suponiendo que el ángulo θ es constante para todos los elementos de la vertiente, se pueden hacer ambos, el equilibrio global de momentos y el de fuerzas, de manera que se encuentran dos valores del Factor de Seguridad, el del equilibrio de fuerzas (F_f) y el de momentos (F_m). Se puede encontrar un valor de θ tal que ambos factores de seguridad coincidan, que será el Factor de Seguridad de la vertiente. Spencer estudió la relación entre F_f y F_m . Dedujo que el Factor de Seguridad resultante del equilibrio de momentos es relativamente insensible a los fuerzas entre elementos. Esta conclusión es coincidente con la de Bishop.

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

El método de análisis desarrollado por Morgenstern y Price (1965) puede ser aplicado tanto a superficies de rotura circulares como no circulares. Es un

método parecido al método de Spencer, pero en el caso de Morgenstern - Price permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas. El esquema de fuerzas entre rebanadas es el mismo que para el método de Spencer (Figura 2.8). Considera que las tensiones y las fuerzas varían continuamente en la superficie, resuelve las componentes normal y paralela a la base para cada elemento formulando ecuaciones de equilibrio de fuerza generales. Supone que existe la siguiente relación entre esta componente vertical y normal:

$$X/E = \lambda \cdot f(x)$$

Dónde $f(x)$ es la función que varía de forma continua a lo largo de la línea, y λ es un valor escala. Para una función dada $f(x)$, los valores de λ y F se encuentran de forma que se cumplan los equilibrios globales de Momentos y Fuerzas. De esta forma $F = F_m = F_f$.

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

2.2.5 Linealización del Criterio de Rotura de Hoek – Brown, según Puell Marín, F; Fuente Martín, P de la; Arenillas Parra, M. 2004.

Si se quieren emplear los parámetros de cálculo según un modelo Mohr – Coulomb, teniendo en cuenta como criterio de rotura de Hoek – Brown, es necesario realizar una simplificación que consiste en linealizar la envolvente curva de rotura de Hoek – Brown.

La envolvente de rotura lineal de Mohr – Coulomb se caracteriza con la cohesión, C' , y el ángulo de rozamiento interno ϕ' , en el plano $\sigma'_n \tau'$, mediante la conocida expresión:

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

O bien por la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso, σ'_c y N_ϕ , en el plano de tensiones principales σ_1 , σ_3 , mediante la expresión:

$$\sigma'_1 = \sigma'_c + N_\phi$$

Siendo,

$$N_\phi = \frac{(1 + \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')}$$

Los valores de C' y ϕ' se pueden calcular a partir de las siguientes expresiones:

$$\sin \phi' = \frac{N_\phi - 1}{N_\phi + 1}$$

Cuando se emplea una Linealización es práctica habitual considerar un valor de la resistencia a la tracción menor, denominada cut – off (Sjoberg 1999), como la que se obtiene, por ejemplo, del criterio de Hoek – Brown.

A continuación se describe el método de Equivalencia de Áreas para realizar la Linealización de la envolvente de Hoek – Brown y obtener un ángulo de rozamiento y cohesión equivalente.

➤ **Método de la Equivalencia de Áreas**

Hoek, Carranza – Torres y Corkum, 2002. Proponen encajar una recta de equilibrio de áreas que queda entre la envolvente curva de Hoek – Brown y la linealizada de Mohr – Coulomb, para un determinado campo de tensiones. Este método toma en consideración un rango de tensiones $\sigma'_t < \sigma'_3 < \sigma'_{3máx}$, siendo σ'_t la resistencia a la tracción y $\sigma'_{3máx}$ la tensión de confinamiento máxima que se espera, y que se tendrá que estimar en cada caso particular, Figura 2.9.

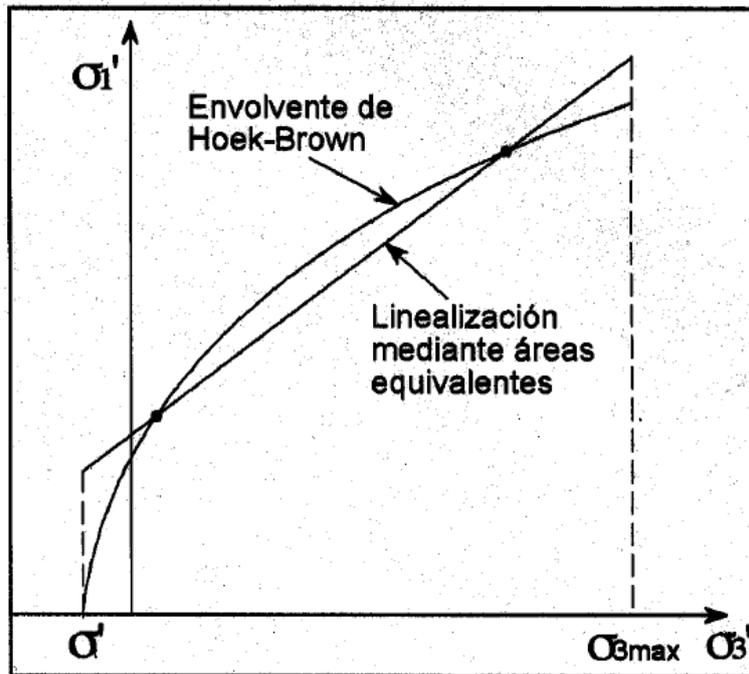


Figura 2.9: Método de Equivalencias de Áreas. (Hoek, Carranza - Torres y Corkum, 2002).

Ventajas e inconvenientes de la Linealización por Equivalencia de Áreas

Este método de Linealización, empleado para obtener una cohesión y ángulo de rozamiento equivalentes, debe de tomarse una tensión de referencia o rango de estados tensionales. Una primera aproximación al estado tensional que tendrá la excavación del talud puede hacerse con modelización numérica en régimen elástico. Adoptando el rango de tensiones resultantes y linealizando, se estarán sobrevalorando ligeramente la cohesión e infravalorando al ángulo de rozamiento porque las tensiones reales del macizo rocoso son menores que las obtenidas con el cálculo puramente elástico al no producirse la plastificación.

En una excavación superficial el estado tensional varía con la profundidad del punto del macizo rocoso respecto a la superficie y, por tanto, no sería correcto emplear una tensión de referencia única. En este sentido y para obtener una mejor aproximación, sería recomendable discretizar la geometría por escalones de tensiones y realizar la Linealización para cada escalón o nivel de tensiones.

Este método de Linealización el más coherente, aunque mantiene los inconvenientes inherentes a la propia Linealización, entre ellos, que unas veces sobrestiman y otras minusvaloran la resistencia del macizo rocoso de acuerdo con los resultados de los cálculos realizados.

➤ **Factor de Seguridad**

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Citado de (Braja, 1984). “La tarea del ingeniero encargado de analizar la inestabilidad de un talud es determinar el factor de seguridad”, como se muestra en la ecuación:

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

FS_s = Factor de seguridad con respecto a la resistencia.

τ_f = Resistencia cortante.

τ_d = Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie de falla.

2.2.6 Movimientos de Masas

Los diferentes tipos de movimientos de masas están condicionados por el grado de fracturamiento del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud, quedando la estabilidad definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa. Como se presentan en los macizos duros o resistentes, las discontinuidades determinan la situación de los planos de rotura. Presentándose modelos de rotura, los más frecuentes son: rotura en cuña, planar y vuelcos.

➤ Desprendimientos

Es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera. Una vez desprendido el material cae desplomándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento de masas rocosas (Varnes, 1978). Durante la caída, los materiales podrán adquirir una alta energía cinética, permitiéndoles abarcar una amplia área a los pies de la ladera, lo cual se acrecentaría si se suma una cantidad importante de material aportado. Bajo estas condiciones, se requiere una evaluación de la geometría de la ladera y de las características específicas de las caídas de roca.

Su propagación con pendientes superiores a los 76° se produce preferentemente por caída libre, por debajo de estos ángulos menores a 45° la propagación se realiza por rodadura (Corominas, 2007). El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden y Varnes, 1996), es decir con velocidades mayores a 5×10^1 mm/s. Datos históricos han demostrado que las velocidades alcanzadas por las caídas de rocas pueden exceder los 100 m/s.

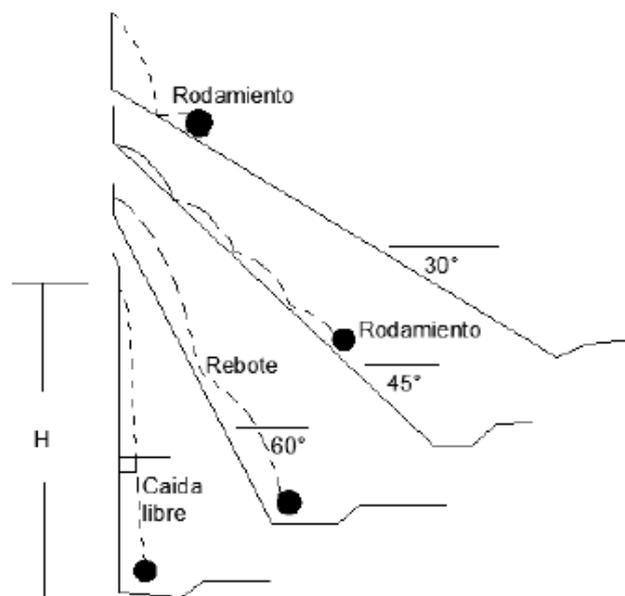


Figura 2.10: Formas de movimiento para caídas de rocas. Modificado de Hoek, 2000.

Se originan dado algún evento que produzca cambios en los esfuerzos actuantes sobre la roca (infiltración de agua en grietas producto de precipitaciones, procesos de hielo-deshielos en climas fríos, meteorización de la roca, sismos,

entre otros). La geometría de la ladera es la responsable de la generación de los eventos, los cuales ocurrirán principalmente en laderas altas, de pendientes pronunciadas y donde el macizo esté fracturado de manera de generar los bloques susceptibles a las caídas.

– **Rotura en Cuña**

Corresponde al desprendimiento de un bloque de roca en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección. Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud, y deben cumplir iguales condiciones que para la rotura plana, siendo el buzamiento la línea de intersección; suele presentarse en macizos con varias familias de discontinuidades, cuya orientación, espaciado y continuidad determinan la forma y volumen de la cuña.

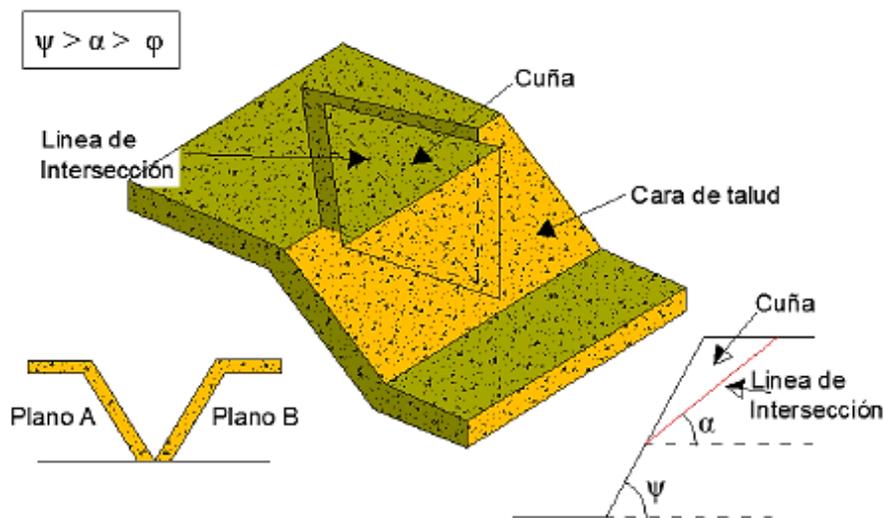


Figura 2.11: Condiciones para Rotura en Cuña. (González de Vallejo, 2002).

Proyección estereográfica para el análisis cinemático de Rotura en Cuña.

– La línea de intersección debe aflorar en el talud. Para esto el buzamiento de la línea de intersección (ψ_i), cuya dirección es la dirección de desprendimiento debe ser menor que el buzamiento de la ladera (ψ_p).

- Si los ángulos de buzamiento de los planos de las estructuras son menores a los ángulos de dirección de buzamiento (Dip Dir) del talud y del azimut de la línea de intersección, entonces el deslizamiento ocurrirá en el plano de las estructuras de mayor buzamiento; en caso contrario el deslizamiento ocurrirá a lo largo de la línea de intersección.
- El buzamiento de la línea de intersección (ψ_p) debe ser mayor que el valor del ángulo de fricción de la superficie (φ_p).

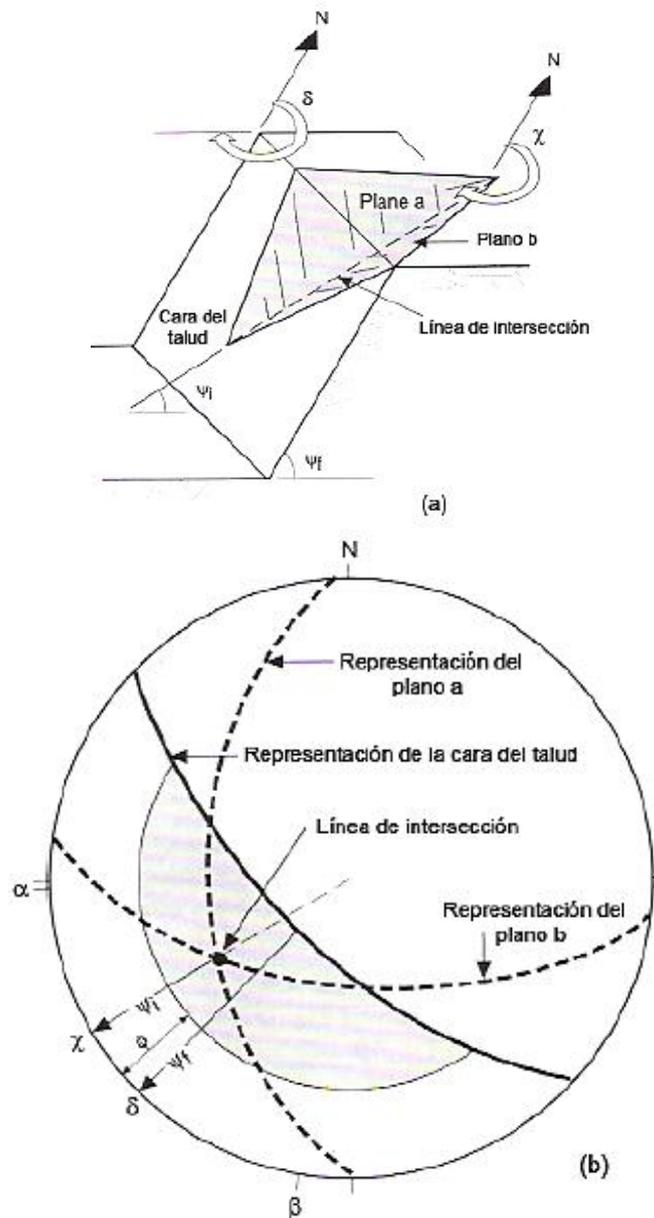


Figura 2.12: a) Condición estructural en una Rotura en Cuña. (b) Representación estereográfica. (Herrera, 2000).

Análisis cinemático de discontinuidades críticas mediante áreas de sombras.

Es un criterio para evaluar si una cuña desliza a través de ambos planos de discontinuidad o a través de uno solo, en cuyo caso, se tratará y se analizará como una rotura plana.

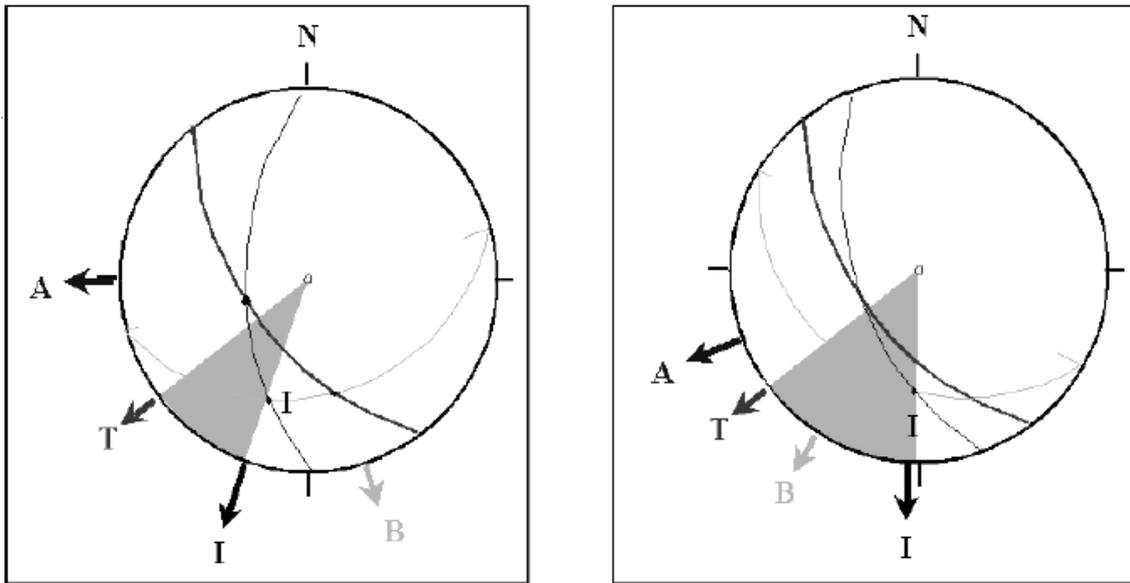


Figura 2.13: Criterio cinemático por áreas de sombras.

Para saber si una cuña es directa o inversa, sólo hay que analizar si los planos que lo forman buzan hacia el mismo o distinto lado de la línea de intersección evaluado con el cono de fricción.

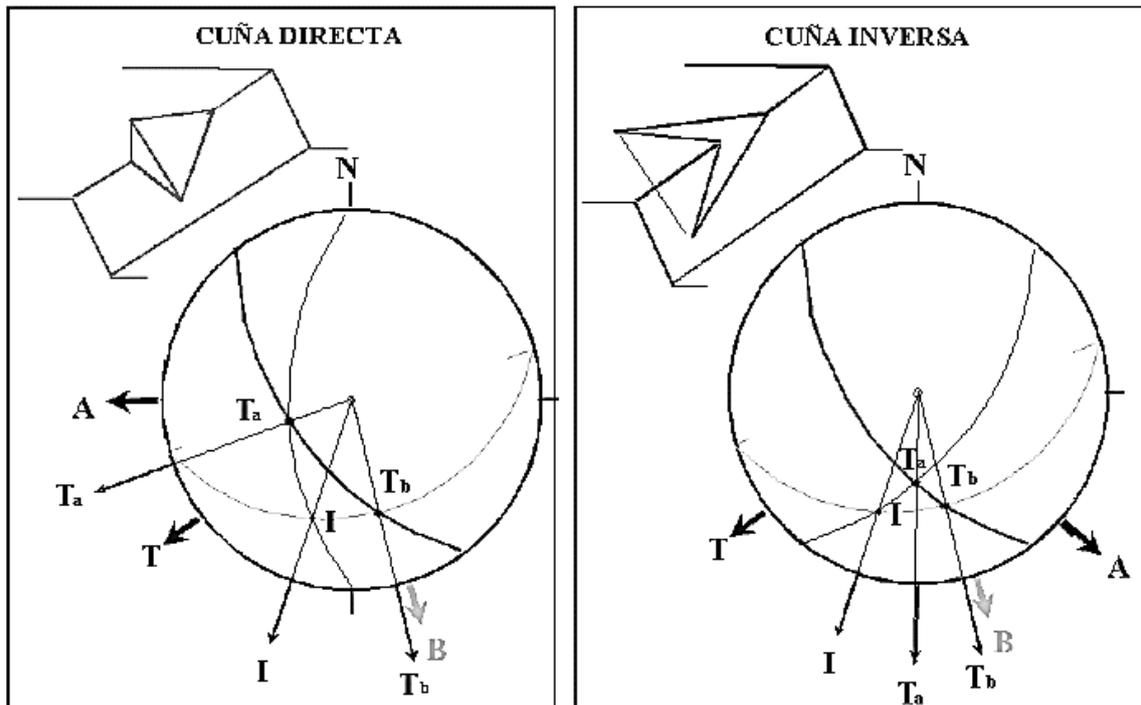


Figura 2.14: Criterio de análisis de cuña directa e inversa.

➤ **Deslizamientos**

Es un tipo de movimiento de masa de suelo o roca, que tiene lugar predominantemente sobre una o más superficies de rotura, o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla. Elementos característicos de este tipo de movimiento son la presencia de superficies de rotura definidas y la preservación a grandes rasgos de la forma de la masa desplazada (Corominas, 1997). En macizos rocosos los deslizamientos son roturas de tipo planar.

– **Rotura Planar**

Se entiende por rotura planar, como aquella en la que el deslizamiento se produce a través de una única superficie plana. Siendo la más sencilla de las formas de rotura posibles se produce cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud. La representación semiesférica en la red de Schmidt de esta condición se observa en la figura 2.16,

se prevé el deslizamiento cuando el rumbo de la familia de discontinuidades es similar al del talud y su buzamiento menor que este. (Gonzáles de Vallejo, 2002).

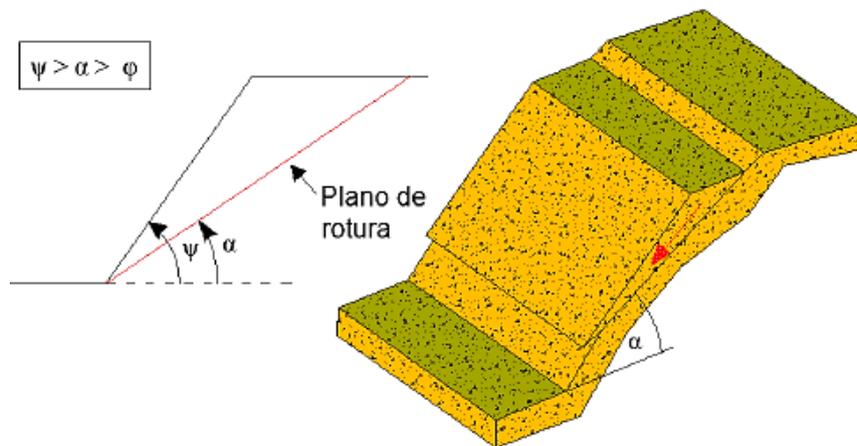


Figura 2.15: Condiciones para Rotura Planar. (Gonzáles de Vallejo, 2002).

Proyección estereográfica para el análisis cinemático de Rotura Planar.

- La dirección de buzamiento (Dip Dir) de la discontinuidad planar (β) debe estar dentro de un rango de 20° con respecto al Dip Dir de la cara principal del talud (α).
- El buzamiento de la discontinuidad (ψ_p) debe ser menor que el buzamiento del talud (ψ_p), y con esto la estructura debe aflorar en el talud.
- El buzamiento de la discontinuidad (ψ_p) debe superar el valor del ángulo de fricción de la superficie (φ_p).

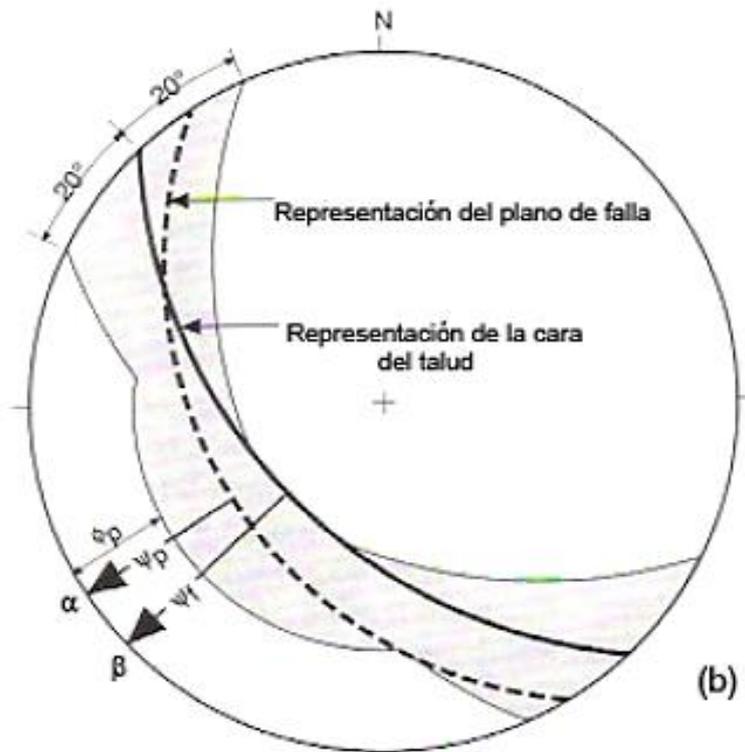
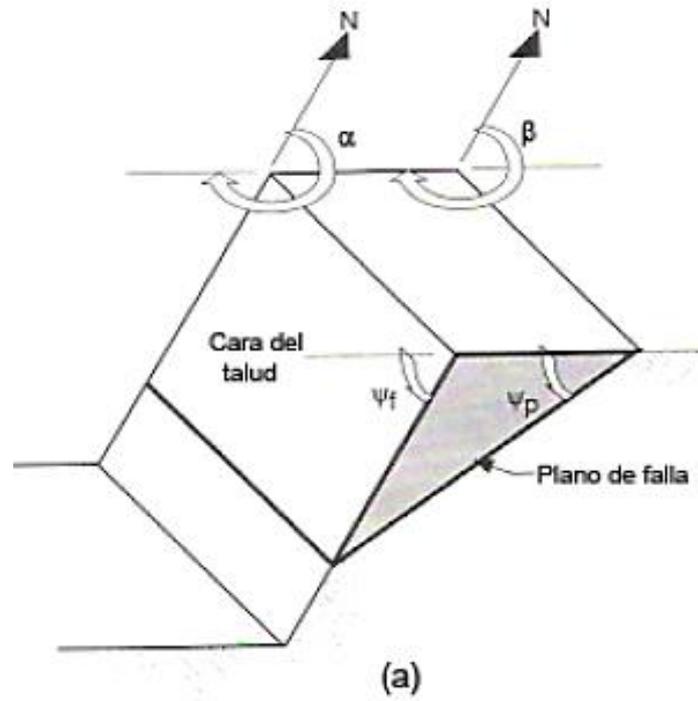


Figura 2.16: a) Condición estructural de una Rotura Planar. b) representación estereográfica. (Herrera, 2000).

- Vuelcos (topples)

Es la rotación hacia delante y hacia el exterior de la ladera, de una masa de suelo o roca alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. La fuerza desestabilizadora es la gravedad así como el empuje ejercido por el terreno adyacente o los fluidos (agua o hielo) en las grietas (Corominas, 1997). Dentro del mecanismo de vuelco pueden distinguirse dos procesos:

Vuelco directo o desplome

La parte movida cae con un movimiento brusco de giro, al menos inicial, apoyado en su base externa. Estos movimientos se producen en macizos rocosos o materiales areno-arcillosos compactados. Si la ladera es empinada, las roturas por vuelco pueden transformarse en caídas.

Vuelco por flexión (flexural toppling)

Tiene lugar en rocas con un sistema preferente de discontinuidades, formando vigas semicontinuas en voladizo (Goodman y Bray, 1976). Las columnas continúan cuando se doblan hacia delante, rompen por flexión. Este tipo de movimiento es característico en esquistos, filitas, pizarras y en secuencias rítmicas finamente estratificadas (facies flysch).

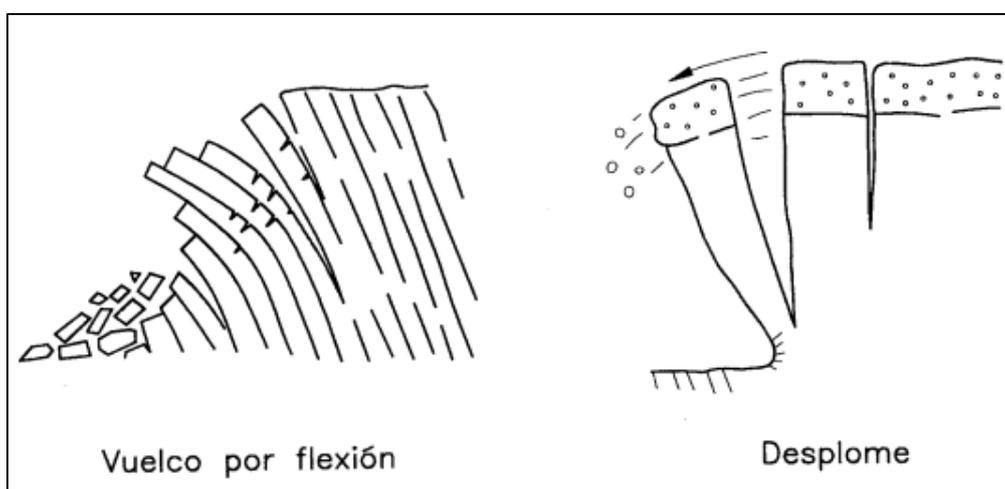


Figura 2.17: Mecanismos de vuelco (Corominas y García Yagüe, 1997).

Proyección estereográfica para el análisis cinemático de vuelcos.

- El azimut de las superficies potenciales de generar toppling debe ser aproximadamente paralelos a la superficie del talud, dentro de un rango de $\pm 20^\circ$.
- El buzamiento de las superficies potenciales de generar toppling (ψ_p), debe ser en dirección opuesta al buzamiento de la ladera (ψ_f). Esta condición y la anterior se traducen en que las diferencias entre el Dip Dir de la superficie de toppling (β) y del talud (α) deben mantenerse dentro de un rango de 160° a 200° .
- La recta normal al plano potencial de toppling ($90^\circ - \psi_p$) debe tener un buzamiento menor que el buzamiento del talud (ψ_f) menos el ángulo de fricción de la superficie (φ_p). Esta condición se representa a continuación.

$$(90 - \psi_p) \leq (\psi_f - \varphi_p)$$

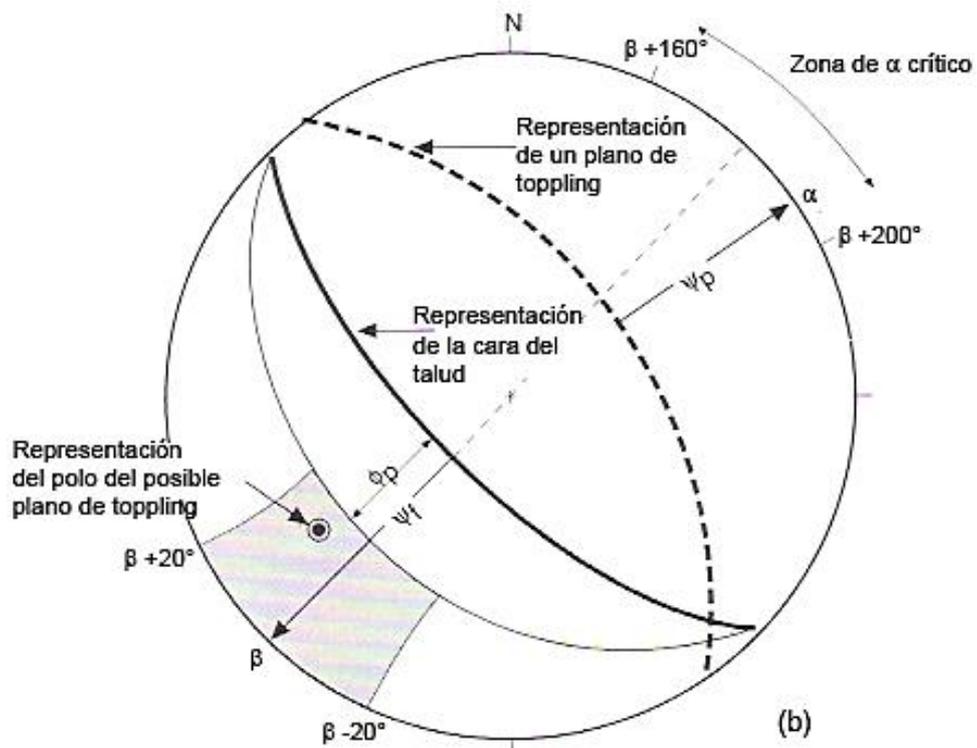
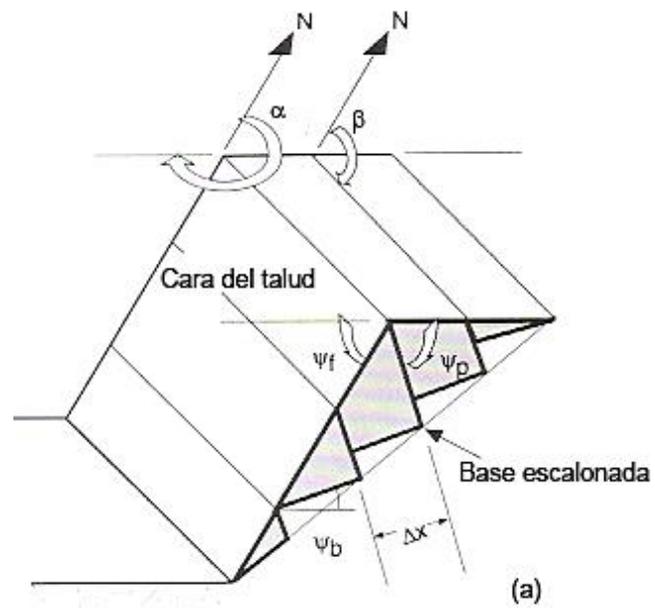


Figura 2.18: (a) Condición estructural para toppling. (b) Representación estereográfica. (Herrera, 2000).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Discontinuidades: Son superficies de estratificación, laminación, juntas, fallas, que rompen la continuidad de las propiedades mecánicas de los bloques rocosos, confiriendo al macizo un comportamiento geomecánico e hidráulico discontinuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de dichos planos (González de Vallejo, 2004).

Factor de seguridad: Es la resistencia global frente a cargas externas que tiene el macizo rocoso antes de sufrir deformaciones permanentes en su estructura (González de Vallejo, 2004).

Factores geológicos: Son la estratigrafía, litología y estructuras geológicas de un talud (González de Vallejo, 2004).

Factores geométricos: Determinan la altura e inclinación de un talud (González de Vallejo, 2004).

Factores geomecánicos: Determinan el comportamiento mecánico del terreno (González de Vallejo, 2004).

Litología: Ciencia que estudia las rocas, emplea el conocimiento obtenido de las exposiciones en el campo o de las muestras de mano. (Huang, 1968).

Macizo rocoso: Es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos. Prácticamente puede considerarse que presentan una resistencia a la tracción nula (González de Vallejo, 2004).

Talud: Superficie artificial inclinada de un terreno que se forma al cortar una ladera (GEMMA, 2007).

Zonas críticas. Delimitación espacial que hace referencia del estado actual respecto a variables físicas y temporales. (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Geográfica

La carretera Lajas – El Tayal se encuentra ubicada al NW de la ciudad de Chota, en el cuadrángulo de Chota (14-f) con una extensión de 7.25 km, las coordenadas que definen el tramo de investigación se encuentran en la Tabla 3.1. Tramo de la carretera Chota – Cochabamba, observándose en el Plano 02 (Plano de Ubicación).

Tabla 3.1: Coordenadas UTM - WGS84 del tramo de investigación.

Tramo	Kilómetro	Este	Norte	Altitud
Punto de Inicio: Lajas	Km 141.700	749973	9274174	2141 m.s.n.m
Punto Final: El Tayal	Km 134.450	744496	9277050	1999 m.s.n.m

3.1.2 Política

País: Perú, Departamento de Cajamarca, Provincia de Chota, Distrito Lajas, Centro Poblado El Tayal.

3.2 ACCESIBILIDAD

El acceso al tramo de investigación, es a través de la carretera asfaltada Cajamarca – Chota, con una distancia de 129 km, un tiempo de 3 horas en automóvil; y se continúa con la ruta de acceso Chota – Lajas – El Tayal.

Tabla 3.2: Acceso al área de investigación.

Ruta terrestre	Distancia	Estado	Tiempo
Cajamarca – Chota	129 Km	Asfaltada	3 horas
Chota – Lajas	9.4 Km	Asfaltada	20 minutos
Lajas – El Tayal	7.25 Km	Asfaltada -Trocha	25 minutos

3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1 Tipo y método de la Investigación

El tipo de investigación fue descriptivo, explicativo no experimental y transversal en el tiempo. Por otro lado, los métodos de investigación utilizados son: Descriptivo, analítico, deductivo y explicativo.

3.3.2 Población de estudio

Taludes de la carretera Lajas – El Tayal, km 141+700 - km 134+450 respectivamente.

3.3.3 Muestra

Puntos de control en los tramos críticos en la carretera Lajas – El Tayal, km 141+700 - km 134+450 respectivamente.

3.3.4 Unidad de Análisis

Son los Factores de Seguridad de las secciones transversales ubicadas en los puntos de control en el corte de carretera Lajas – El Tayal, km 141+700 - km 134+450 respectivamente, correspondientes a los diferentes tipos de litomorfoestructuras.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 Técnicas

- Análisis documental, observación.
- Interpretación de imágenes satelitales.
- Ensayos geomecánicos y recolección de información mediante tablas geomecánicas.
- Proceso de información de propiedades geomecánicas en el software Rock Data v.4.
- Análisis mediante Software Dips v.6., Slide v.6.

3.4.2 Instrumentos y Materiales

- GPS Garmin eTrex 20
- Libreta de Geólogo
- Brújula Brunton Azimutal, Geotécnica
- Picota de Geólogo
- Flexómetro de 5m
- Lápiz de dureza
- Tablas geomecánicas
- Cámara digital 14 Mpx
- Laptop Hp

3.4.3 Software´s

- ArcGIS 10.3
- Dips v.6
- RocData v.4
- AutoCAD 2016
- Slide v.6

3.5 PROCEDIMIENTO

3.5.1 Etapa de gabinete

Esta etapa se conforma en dos fases: la primera conformada por una planificación de tareas a realizar anexado a una recopilación y análisis de teorías relacionadas con el problema de investigación, evaluación de imágenes satelitales para un mejor estudio de estructuras y geomorfomas. Se elaboraron los planos básicos de ubicación y geológico, este último con la data de la carta 14-f (Chota) tomado del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en base al modelo digital de elevaciones (MED) se diseñaron el plano topográfico. La segunda fase lo conforma campañas de campo constituyendo un análisis e interpretaciones de los datos obtenidos en campo.

3.5.2 Etapa de campo

Se realizó el cartografiado geológico de la carretera Lajas – El Tayal, km 141+700 - km 134+450 respectivamente a escala 1: 20 000; logrando un análisis descriptivo, realizamos la caracterización geomecánica y geotécnica de los taludes críticos permitiendo definir las condiciones geotécnicas, evidenciando inestabilidad.

3.5.3 Etapa final

Con la información obtenida en las etapas anteriores, se procesó e interpretó utilizando software's como: SAS Planet, ArcGIS 10.3, Rock Data v.4, Dips v.6, AutoCAD 2016 y Slide v.6. Plasmados en los 08 planos temáticos.

3.6 ESTRATIGRAFÍA

En la carretera Lajas – El Tayal, se encuentra las diferentes unidades geológicas que intervienen en el comportamiento geotécnico, puesto que se encuentra rocas pertenecientes al Cretácico Inferior: Formación Carhuaz sobre el cual suprayacen las Formaciones de Cretácico Inferior: Inca, Chulec, Pariatambo, Formaciones del Cretácico Superior: Grupo Pulluicana, Grupo Quilquiñan y Formación Cajamarca. Presentando secuencias estratigráficas de areniscas, lutitas calcáreas, calizas nodulares de color gris claro hasta oscuras, calizas arenosas y margas gris oscuras, todas ellas en forma de estratos. También están presentes depósitos cuaternarios de tipo aluvial, fluvial y coluvial, en todos los casos sin ninguna tendencia estratiforme y muy heterogéneos.

3.6.1 Grupo Goyllarisquizga ($K_i - g$)

3.6.1.1. Formación Carhuaz ($K_i - ca$)

En la carretera Lajas – El Tayal, aflora la Formación Carhuaz (K_i-ca) caracterizado por presentarse como un conjunto de areniscas intercaladas con lutitas con presencia de óxidos (Hematita).



Foto 3.1: Areniscas de la Formación Carhuaz.
Coordenadas: E 746554, N 9275504, Cota 2083 m.s.n.m.

3.6.2 Formación Inca ($K_i - i$)

Constituye una secuencia netamente transgresiva y somera; logramos apreciar una secuencia de intercalaciones litológicas entre areniscas calcáreas, lutitas ferruginosas, con especial coloración en una zona que va de los rojizos hacia amarillo anaranjado.



Foto 3.2: Formación Inca.
Coordenadas: E 746574, N 9275514, Cota 2088 m.s.n.m.

3.6.3 Formación Chulec ($K_i - ch$)

Sobreyace a la Formación Inca evidenciándose claramente las transiciones entre la Formación Chulec, siendo un ambiente marino profundo. Constituida por calizas arenosas, lutitas calcáreas, margas; adquieren un color crema-amarillento, por meteorización, presentando aspecto terroso amarillento.



*Foto 3.3: Calizas nodulares de la Formación Chulec.
Coordenadas: E 745664, N 9276166, Cota 2090 m.s.n.m.*

3.6.4 Formación Pariatambo ($K_i - pa$)

Aflora en la comunidad de Ajipampa, en el Km 138+250 de la carretera Chota – Cochabamba; su litología consiste en intercalaciones de calizas negras, bituminosas de olor fétido con capas delgadas de lutitas bituminosas.



*Foto 3.4: Calizas bituminosas de la Formación Pariatambo.
Coordenadas: E 747838, N 9275235, Cota 2081 m.s.n.m.*

3.6.5 Grupo Pulluicana ($K_s - p$)

Aflora en el Km 139+500 hasta el Km 139+850, litológicamente predomina calizas packstone grisácea, arcillosas, que se meteoriza a crema o marrón claro, se presenta en capas medianas, nodulares regularmente estratificadas; intercaladas con capas de margas marrones.



Foto 3.5: Calizas Grupo Pulluicana.
Coordenadas: E 747838, N 9275235, Cota 2081 m.s.n.m.

3.6.6 Grupo Quilquiñan ($K_s - q$)

Se encuentran pequeños afloramientos en el Km 140+820; se caracteriza por su variedad de fauna fosilífera, y se compone de lutitas deleznables gris oscuras y margas azuladas en capas delgadas que se meteorizan a marrón oscuro o marrón rojizo con intercalación de calizas delgadas.



Foto 3.6: Afloramiento de la Formación Quilquiñan-Mujarrum.
 Coordenadas: E 749107, N 9274692, Cota 2115 m.s.n.m.

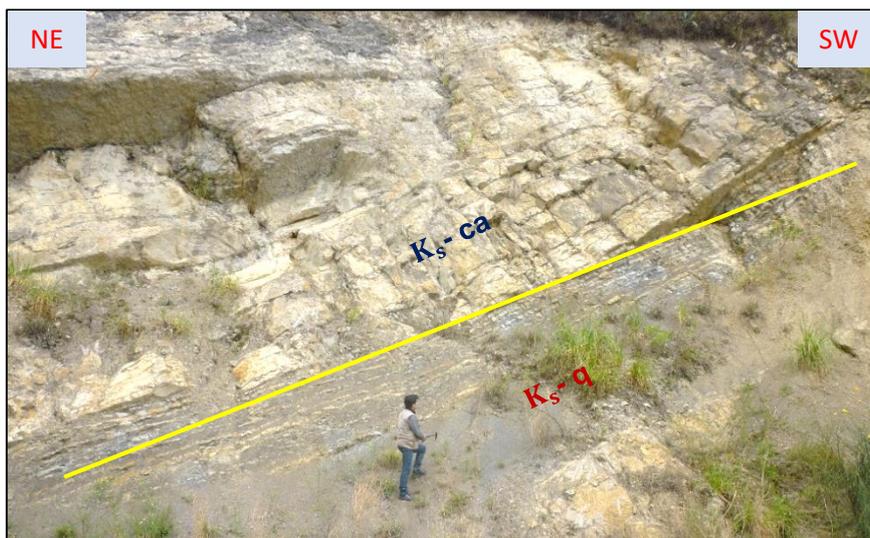


Foto 3.7: Contacto litológico (K_S - ca / (K_S - q)).
 Coordenadas: E 749296, N 9274826, Cota 2137 m.s.n.m.

3.6.7 Formación Cajamarca (K_S – ca)

Aflora en el distrito de Lajas, Km 141+575; tiene una litología uniforme, estratificada en capas medianas, que consiste en una caliza fina y pura, color marrón claro que se meteoriza a tonos blanquecinos o gris claros.



Foto 3.8: Calizas bien estratificadas de la Formación Cajamarca.
Coordenadas: E 749886, N 9274288, Cota 2134 m.s.n.m.

3.6.8 Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios más predominantes están constituidos por terrazas aluviales, fluviales, coluviales, en ambas márgenes del río Chotano, todos los depósitos se componen de bloques, gravas, arenas, limos y arcillas.

Son importantes los depósitos aluviales que se encuentran en ambas márgenes del río Chotano, los cuales no presentan deslizamientos y son aprovechados por los pobladores como tierras de cultivo y pastar sus animales.

Depósitos Aluviales (Qh – al)

Los depósitos aluviales se hallan en gran parte del área de investigación, ubicados en la parte media e inferior de las quebradas, conformados en su mayoría por suelos gravo-arcillosos y arcillas de plasticidad alta.



Foto 3.9: Depósitos Aluviales en el área de investigación.
Coordenadas: E 745827, N 9275963, Cota 2091 m.s.n.m.

Depósitos Coluviales (Qh – Co)

Se encuentran constituidos el flanco izquierdo y derecho de la carretera Lajas – El Tayal; caracterizándose por contener bloques, gravas angulosas a subangulosas distribuidas en forma caótica, sin selección ni estratificación aparente, englobando una matriz arenosa que se distribuye irregularmente.



Foto 3.10: Depósitos Coluviales en el margen izquierdo del río Chotano.
Coordenadas: E 749387, N 9274805, Cota 2148 m.s.n.m.

Depósitos Fluviales (Qh- fl)

Estos depósitos se hallan en los márgenes del río Chotano y quebradas afluentes, poseen materiales que han sido transportados grandes distancias, su composición puede ser variada en su mayoría los clastos redondeados, y gravas, limos y arcillas.



Foto 3.11: Depósitos fluviales en el río Chotano Coordenadas: E 749973, N 9274174, Cota 2141 m.s.n.m.

3.7 GEOMORFOLOGÍA

3.7.1 Unidades Morfogenéticas (UM)

Estructuras geológicas conformadas por los procesos geotectónicos entre el Cretácico Inferior hasta el Plioceno y con procesos exógenos hasta la actualidad, estos últimos son los procesos morfogenéticos que definieron las morfoestructuras que encontramos en el área de investigación. Las geoformas están directamente relacionadas con los procesos de erosión y acorde con su génesis, edad de las rocas, geometría del relieve y tipo de relieve. (Rodríguez, 2016).

Es por ello que, para las geoformas o UM que se encuentra en la zona, se han definido según la clasificación que se muestra en el Tabla 3.3, 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.

Tabla 3.3: Clasificación para Unidades Morfogenéticas.

TIPO DE RELIEVE	GEOMETRÍA	LITOLÓGÍA	ORIGEN	EDAD DE LA LITOLÓGÍA		
UNIDAD MORFOGENÉTICA (UM)	PENDIENTE	ASOCIADA A SU COMPOSICIÓN	ASOCIADO AL EVENTO O PROCESO GEOLÓGICO	PERÍODO	ÉPOCA	EDAD
Planicies	0° - 8°					
Lomadas	8° - 20°					
Laderas	20° - 50°					
Escarpas	> 50°					

Fuente: Rodríguez, 2016.

La clasificación es bastante simple, concreta y económica cuando se trata de definir el comportamiento y estabilidad de lugares con problemas geodinámicos y geotécnicos. La clasificación propuesta se diferencia de la clasificación de (Tapia-Varela y López-Blanco, 2001), por la denominación del relieve como Unidades Morfogenéticas (UM) y la cuantificación de la geometría (pendientes). (Rodríguez, 2016).

3.7.2 Planicies

Se denomina planicie a una superficie en la cual su morfología es bastante homogénea, ligeramente ondulada, poca erosión actual y fácil de manejar para actividades agrícolas y ganaderas. Está afectada por los procesos de erosión pluvial.

El rango de pendientes es de 0° a 8° define las planicies y comprende áreas distribuidas en el cauce del río Chotano, relacionadas con los depósitos

aluviales, son producto de los procesos de erosión de las rocas del Cretácico hasta el Neógeno y depositadas en el Cuaternario entre el Pleistoceno y Holoceno.



Foto 3.12: Planicie ubicada al margen izquierdo del río Chotano.
Coordenadas: E 749308, N 9274874, Cota 2143 m.s.n.m.

3.7.3 Lomadas

Terreno de superficie con 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.

Litológicamente se encuentra en las Formaciones Chulec, Pariatambo, Grupo Quilquiñan, Formación Cajamarca, distribuyéndose en ambos flancos del río Chotano.



Foto 3.13: Lomas en el margen derecho del río Chotano, con ligera vegetación.
Coordenadas: E 749308, N 9274874, Cota 2143 m.s.n.m.

3.7.4 Laderas

Sobre las unidades litológicas compuestas principalmente por calizas, lutitas, fuertemente fracturadas y altamente meteorizables, se tienen pendientes en el intervalo de 20° a 50°, debido a los agentes erosivos y los cambios litológicos pero en especial a su comportamiento frente a las deformaciones estructurales que han actuado durante fines del Mesozoico y el Cenozoico, los cuales han dado lugar a las geformas actuales. Son comunes a lo largo de todo el tramo de carretera.



Foto 3.14: Laderas en la Formación Cajamarca, margen izquierdo el río Chotano.
Coordenadas: E 749470, N 9274608, Cota 2146 m.s.n.m.

3.7.5 Escarpas

Según Dávila (2011), citado por Rodríguez, (2016), se define como fuerte desnivel en los terrenos que delimita a dos superficies más o menos planas. Al ser sometidas a procesos de excavación mecánica entran en estado de desequilibrio continuo y son muy difíciles de estabilizar. No generan deslizamientos de ningún tipo debido a que su buzamiento está en contra de la dirección del Talud, además son rocas duras. Son comunes a lo largo de todo el margen derecho del río Chotano, también encontramos escarpas moderadas pertenecientes al Cretácico Inferior, sobre las calizas de la Formación Chulec, Grupo Pulluicana y Formación Cajamarca. Con fuertes pendientes de hasta 78° debido principalmente al retrabajo de los agentes geodinámicos sobre los macizos rocosos.

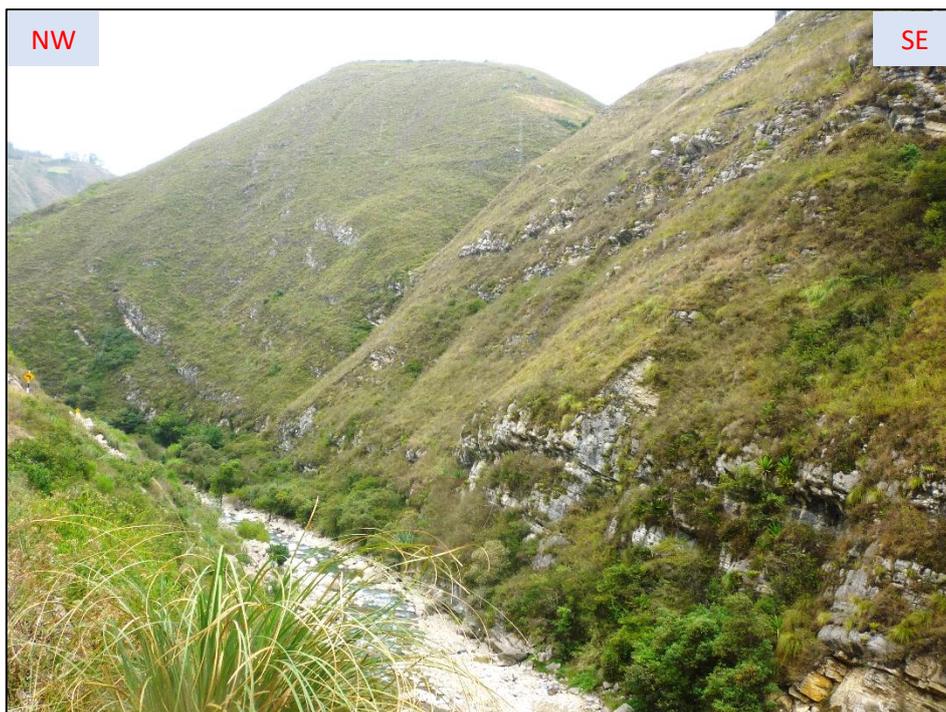


Foto 3.15: Escarpas que no generan deslizamiento debido a que su dirección de buzamiento es en contra de la dirección del talud.

Coordenadas: E 749750, N 9274351, Cota 2146 m.s.n.m.

Las Unidades Morfogénicas encontradas se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Unidades Morfogenéticas del área de Investigación.

TIPO DE RELIEVE	GEOMETRÍA	LITOLOGÍA	ORIGEN	EDAD DE LA LITOLOGÍA		
				PERÍODO	ÉPOCA	EDAD
UNIDAD MORFOGENÉTICA (UM)	PENDIENTE	ASOCIADA A SU COMPOSICIÓN	ASOCIADO AL EVENTO O PROCESO GEOLÓGICO	PERÍODO	ÉPOCA	EDAD
Planicies	0° - 8°	Depósitos al, fl,	Transportados	Cuaternario	PI - Ho	
Lomadas Laderas	8° - 40°	Grupo Pulluicana	Sedimentario	Cretácico	Medio	Cenomani-ano
Lomadas Laderas	12° - 38°	Fm. Pariatambo	Sedimentario	Cretácico	Medio	Albiano
Lomadas Laderas	20° - 35°	Fm. Chulec	Sedimentario	Cretácico	Medio	Albiano
Laderas Escarpas	45° - 74°	Fm. Cajamarca	Sedimentario	Cretácico	Medio	Turoniano

3.8 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La carretera Lajas – El Tayal, ha sido afectada por la acción de las diversas fuerzas, las cuales han producido deformaciones en las rocas, por ende se encuentra controlada por estructuras continuas y discontinuas, dentro de las estructuras continuas (anticlinales, sinclinales y micropliegues) y en las discontinuas con una falla activa en la Formación Chulec, e intenso diaclasamiento.

3.8.1 Estructuras Primarias

Estas estructuras son aquellas cuya formación ocurrió de manera conjunta con la deposición del sedimento, sedimentación, en lo cual se destaca la estratificación, siendo esta estructura la que determinara el ambiente de deposición de los sedimentos, es decir, en zonas profundas o en zonas someras.

➤ Estratos

En la carretera Lajas – El Tayal se presenta rocas calizas, lutitas, margas con espesores entre 20 cm hasta 85 cm, siendo una de sus características principales el medio y alto grado de fracturamiento.



Foto 3.16: Estratos de la Formación Cajamarca.
Coordenadas: E 749886, N 9274288, Cota 2136 m.s.n.m.

3.8.2 Estructuras Secundarias Tectónicas

Las estructuras tectónicas se relacionan con los procesos endógenos (energía procedente del interior de la Tierra que son de compresión y tracción) que ocasionan la deformación (cambios de forma y volumen) y desplazamiento de cualquier tipo de roca.

➤ Dislocaciones Tectónicas Coherentes

Las dislocaciones son un mecanismo de deformación y se les denomina coherente porque varía la forma del estrato sin perturbar su continuidad.

Anticlinal

Esta estructura está presente en calizas delgadas con estratificación rítmica, intercaladas con lutitas pertenecientes a la Formación Pariatambo, orientación del flanco izquierdo de $N12^\circ$ con buzamiento $54^\circ SE$, el flanco derecho con una orientación de $N164^\circ$ y buzamiento $58^\circ SW$. Anticlinal y sinclinal en el área de investigación, ver plano 06 (Plano Geológico).

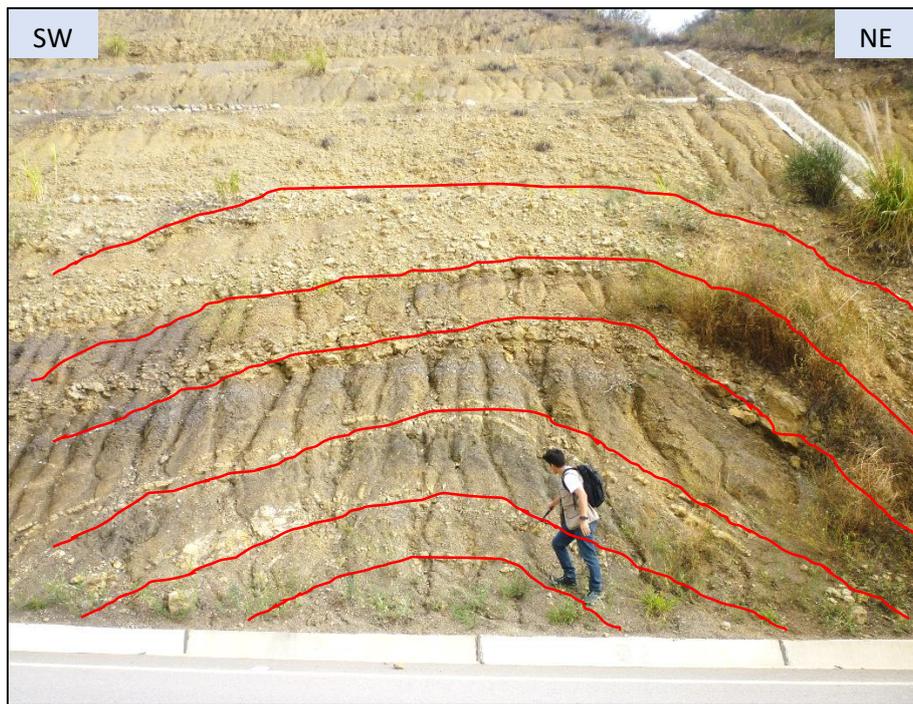
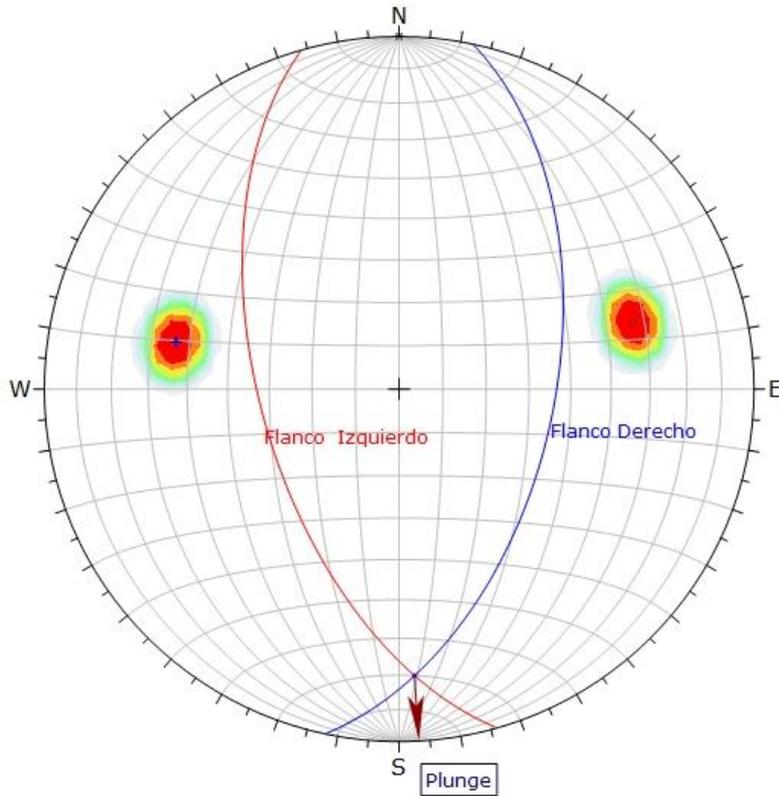


Foto 3.17: Anticlinal en el área de investigación.
Coordenadas: E 745072, N 9276401, Cota 2051 m.s.n.m.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors
▪	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 5.00
	5.00 - 10.00
	10.00 - 15.00
	15.00 - 20.00
	20.00 - 25.00
	25.00 - 30.00
	30.00 - 35.00
	35.00 - 40.00
	40.00 - 45.00
	45.00 - 50.00
Maximum Density	49.55%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	58	254	Flanco Izquierdo
2	■	54	102	Flanco Derecho

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	2 (2 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	1
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.1: Representación del anticlinal con ángulo de plunge de 21°, una dirección de charnela NW-SE. Falsilla de Schmidt.

Micropliegue

Son buenos indicadores del sentido del movimiento que es limitado y pueden registrar deformaciones locales. La estratigrafía está formada por estratos de poco espesor ya que poseen una gran plasticidad y pueden formar este tipo de estructuras.



Foto 3.18: Estratificación y pliegues en la Formación Chulec.
Coordenadas: E 745072, N 9276401, Cota 2051 m.s.n.m.

➤ **Dislocaciones Tectónicas Disyuntivas**

Diaclasas

Las diaclasas son deformaciones frágiles de las rocas y no va acompañada de deslizamiento de los bloques que determina, no siendo el desplazamiento más que una mínima separación transversal.

Las diaclasas individuales se distinguen por la dimensión de su hendidura, extensión, posición en el espacio y respecto a otros elementos de las estructuras

tectónicas. Según la dimensión de la hendidura se pueden distinguir diaclasas ocultas, cerradas y abiertas.

Las ocultas, no logran verse solo se evidencian al fracturar al macizo. Las cerradas son aquellas que se ven a simple vista, y las abiertas, tienen hendidura. La mayoría de diaclasas tienen lugar, perpendicularmente a la estratificación, otras inclinadas respecto a las capas. Y estas pueden diferenciarse con sus respectivos rumbos y buzamientos.

En el área de investigación son las que más abundan en los estratos. Diaclasa 01, Diaclasa 02 (/).



Foto 3.19: Diaclasas con orientación: 01: N114° y Buz 60°, 02: N235° y Buz 88°.
Coordenadas: E 744989, N 9274228, Cota 2136 m.s.n.m.

Fallas

Son producto de las deformaciones dúctiles, que generan roturas en las rocas a lo largo de la cual ha tenido lugar un desplazamiento. En la zona de investigación, fue reconocida una falla muy importante porque genera hundimiento en la pavimentación de la carretera.

Falla Tayal

Se evidencia una falla de rumbo activa con una orientación N138° y buzamiento 48° SW; se visualiza un ligero desplazamiento en el relieve de la ladera ubicada en el talud de la carretera, la cual se proyecta produciendo un desplazamiento vertical continuo en la carretera



Foto 3.20: Falla de rumbo en el área de investigación.
Coordenadas: E 744989, N 9276403, Cota 2050 m.s.n.m.

3.9 GEOTÉCNIA

El comportamiento geotécnico de la carretera Lajas – El Tayal se ha sectorizado por tramos críticos, dentro de los cuales se definió el comportamiento geológico – geomecánico, mediante el método empírico, que corresponde a la caracterización geomecánica, utilizando las principales clasificaciones geomecánicas como Valoración del Macizo Rocoso (RMR) Bieniawski 1989; Índice de Calidad de la Roca (RQD) según Deere 1967 e Índice de Resistencia Geológica (GSI) según Hoek, 2013. Dentro de la metodología analítica se realizó proyecciones estereográficas, con las familias de discontinuidades propensas a producir las fallas del tipo planar, cuña y vuelco. Con ambas metodologías se

obtiene condiciones de inestabilidad y con los factores de seguridad se logró definir la estabilidad de los taludes.

Para definir las condiciones sísmicas se tomó como referencia el Reglamento Nacional De Edificaciones – 2006, con su Modificatoria según DS 003 – 2016 – Vivienda, en su capítulo II de Peligro Sísmico, donde indica que: “El territorio nacional se considera dividido en cuatro zonas, como se muestra en la Figura 3.3. La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica”.

Según lo indicado anteriormente las cuatro zonas sísmicas implican el entendimiento de como se debe manejar la sismicidad para cualquier proyecto, en el caso nuestro para taludes; nuestra área de investigación está clasificada como una área de peligro, que corresponde la zona sísmica 3, con una aceleración sísmica máxima de 0.35, con coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.175 y coeficiente máximo vertical de 0.088, calculado con el software LOADCAP de GEOSTRU, como se muestra en la Figura 3.2.

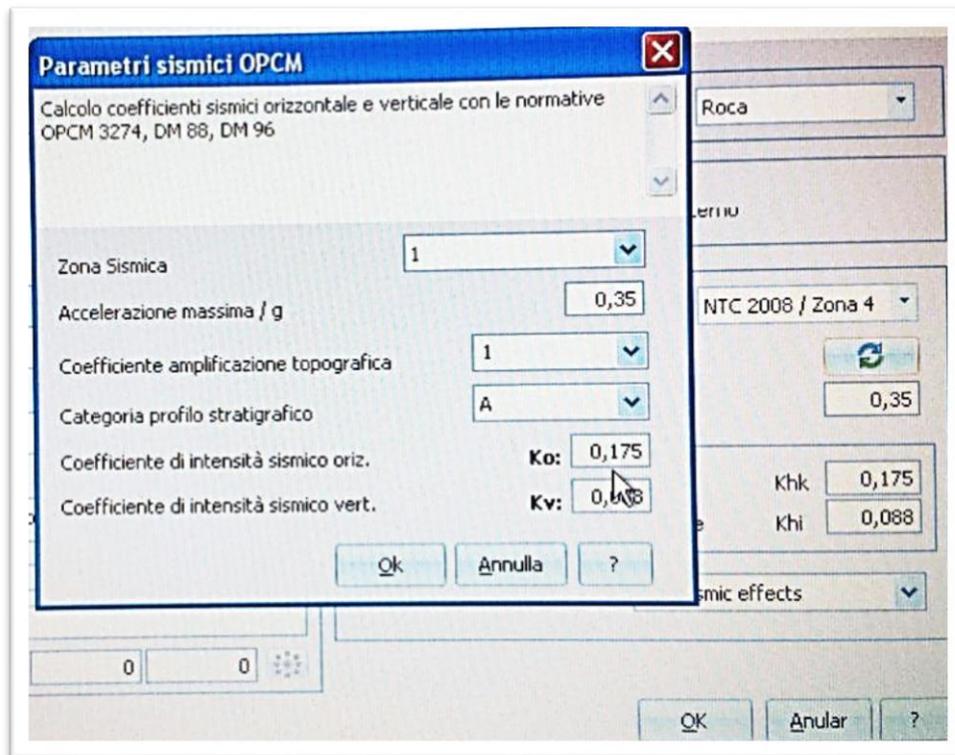


Figura 3.2: Cálculo del coeficiente sísmico horizontal y vertical, mediante el Software LOADCAP de GEOSTRU.

El software trabaja con EUROCODE, es un conjunto de normas europeas para la ingeniería, redactadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) y que pretenden unificar criterios y normativas en las materias de diseño, cálculo y dimensionado de estructuras y elementos prefabricados para edificación. Entonces estos Eurocódigos no son para nosotros los latinoamericanos, sin embargo lo utilizamos porque su clasificación para zonas sísmicas coincide con las del Perú y el software es de Europa, en este caso de Italia, entonces tenemos que indicarle el tipo de proyecto, pero con la variante de que para nosotros la zona sísmica 3 para ellos es la zona sísmica 1.

Mapa de Zonificación



Figura 3.3: Mapa de zonas sísmicas del Perú. (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016).

En cuanto a la precipitación del área de investigación las máximas precipitaciones se manifiestan entre los meses de febrero - abril y setiembre - noviembre, y mínimas precipitaciones entre junio - agosto; las mínimas precipitaciones no llegan a cero.

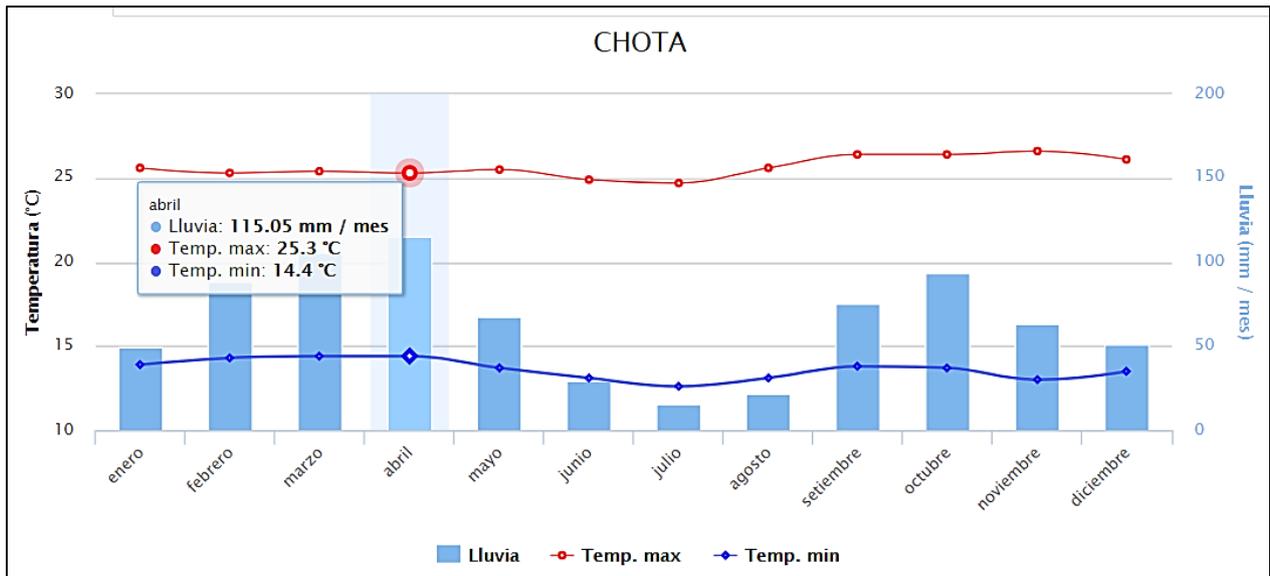


Figura 3.4: Promedio de precipitación y temperatura de Chota. (SENAMHI, 2017).

- El análisis con el software Dips v.6, se utilizó la proyección de Schmidt (igual-área), recomendable para análisis cinemáticos.
- Para el análisis con el software Slide v.6, se tuvo en consideración lo siguiente:

Los métodos de dovelas utilizados fueron los que realizan equilibrio de fuerzas y momentos: LE/Morgenstern-Price, Bishop Simplificado y Spencer, el número de dovelas por superficie de análisis fue de 50, tolerancia de 0.005 y 75 máximas iteraciones, el método de búsqueda de la falla crítica fue de “Auto Refine Search”.

Escenarios de análisis

Se realizó el análisis de taludes en cinco (05) escenarios que se describen en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Descripción de escenarios para análisis de taludes.

Análisis	Escenario	Kh	Kv	Nivel Freático	Descripción
1	Natural	0	0	Ausente	Estado den condiciones drenadas estáticas
2	Saturación Parcial	0	0	Profundidad media del material crítico	Condiciones de lluvia intensas
3	Saturación Total	0	0	Superficie del terreno	Condiciones de lluvia extraordinariamente intensas
4	Sismicidad Máxima	0.175	0.088	Ausente	Máximas aceleraciones sísmicas en la zona
5	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.175	0.088	Altura media del material crítico	Combinación de las condiciones 2 y 4

La gravedad fue constante en todos los escenarios (9.81m/s^2).

3.9.1 TRAMO CRÍTICO 01 – PROGRESIVAS Km 141+575 - Km 141+625

Está compuesto por calizas mudstone perteneciente a la Formación Cajamarca (K_S -ca) con planos de estratificación como se muestra en la Tabla 3.6, conformando tres familias de discontinuidades; moderadamente meteorizados y el estrato buzando a favor del talud. Se evidencian deslizamientos y desprendimientos de rocas, siendo estos procesos afectados por la precipitación y sismicidad, los cuales inestabilizan el talud.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S	ESTE	NORTE	2136 m.s.n.m
		749886	9274228	



Foto 3.21: Afloramiento de calizas de la Fm. Cajamarca en las progresivas Km 141+575 - Km 141+625.

Tabla 3.6: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 01.

LITOLOGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN			
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD	
Calizas / Cajamarca	1 = Fresco	1 = Alto	1 = Bloq. regular	ESTRATO	43	54	
				FAMILIA 1	60	204	
	2 = Leve	2 = Medio	2 = Bloq. Irregular	FAMILIA 2	88	325	
				GEOMETRÍA DEL TALUD			
	3 = Moderado	3 = Bajo	3 = Bloq. y Capas	ALTURA	16 m		
				PIE	35 m		
	4 = Alto		4 = Frac. Intenso	D	68		
				DD	49		
	3	2	3				

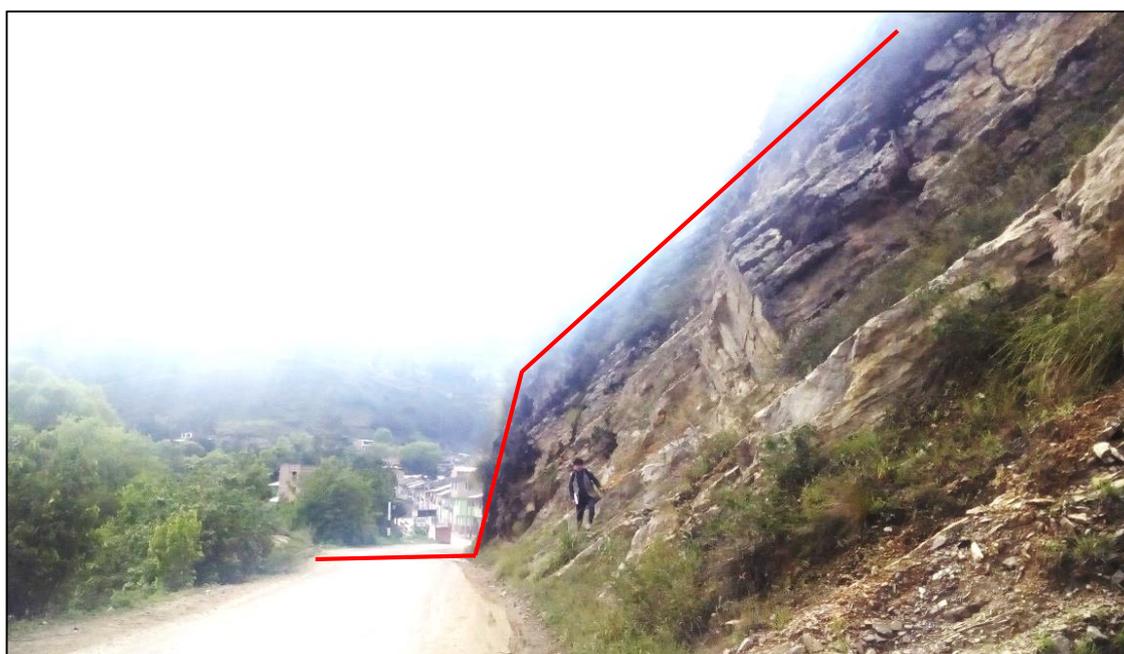


Foto 3.22: Perfil del talud en la progresiva Km 141+575.

Tabla 3.7: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 01.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARÁMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	10	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	1
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
VALOR TOTAL RMR						51	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque las discontinuidades son favorables; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas. Como se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Estimación del GSI del talud crítico 01.

ESTIMACIÓN DEL GSI						
CÁLCULO DEL RQD						
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$			ND	L(m)	λ	RQD
			58	4	14.5	57.64
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989						
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉	
2	0	5	1	3	11	
$GSI=1.5JCOND_{89} + RQD/2$				GSI = 45.32		

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 01 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.5.

Tabla 3.9: Propiedades geomecánicas del talud crítico 01.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CAJAMARCA					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	90 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.446	
GSI	45.32		s	0.000362	
Mi	9	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	a	0.508	
D	0.7		c	0.3048	Mpa
Ei	58500 Mpa		ϕ	51.78°	
MR	650	PÁRÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.073	Mpa
			sigc	1.608	Mpa
			sigcm	7.777	Mpa
			Erm	4669.459	Mpa

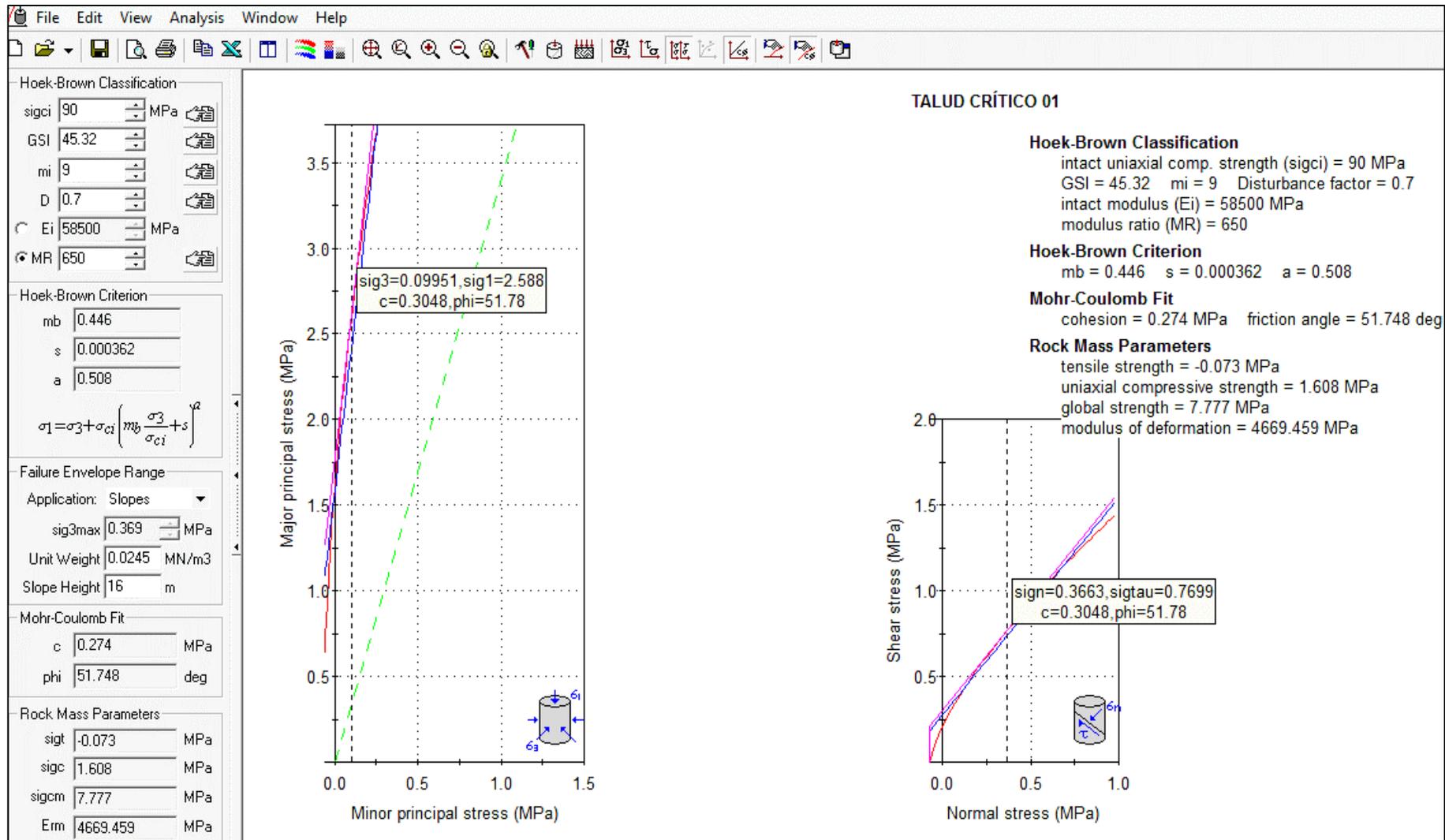
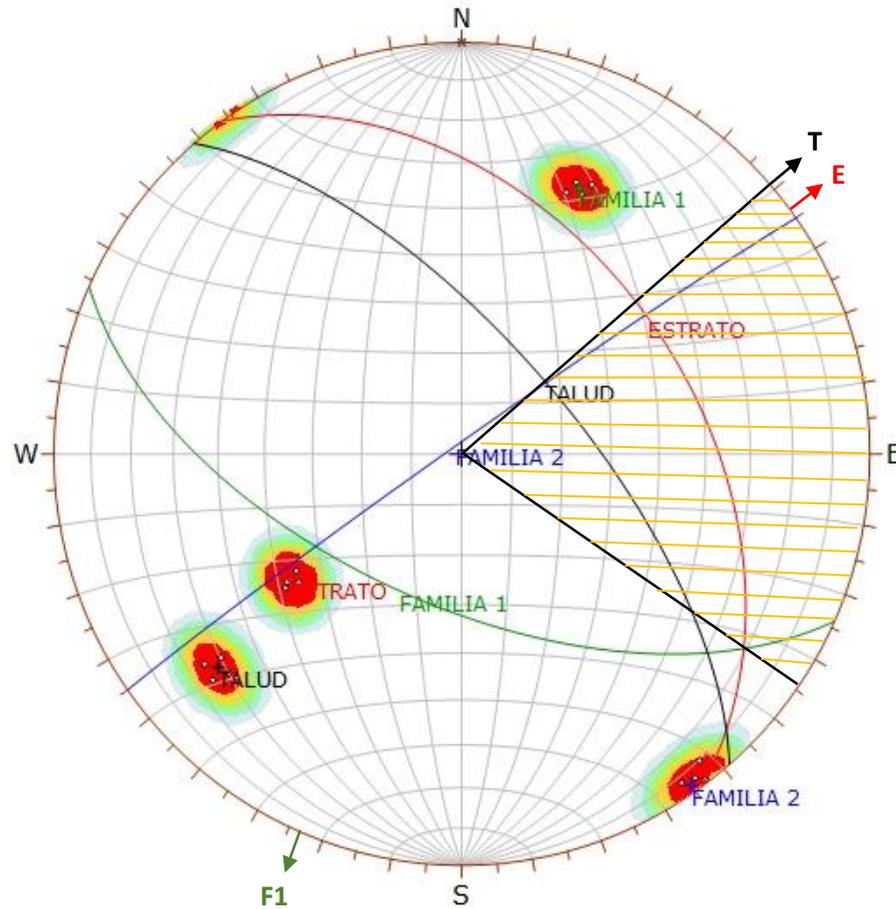


Figura 3.5: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Cajamarca.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.10
	4.10 - 8.20
	8.20 - 12.30
	12.30 - 16.40
	16.40 - 20.50
	20.50 - 24.60

Maximum Density	24.57%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		43	54	ESTRATO
2		60	204	FAMILIA 1
3		88	325	FAMILIA 2
4		68	49	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.6: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.

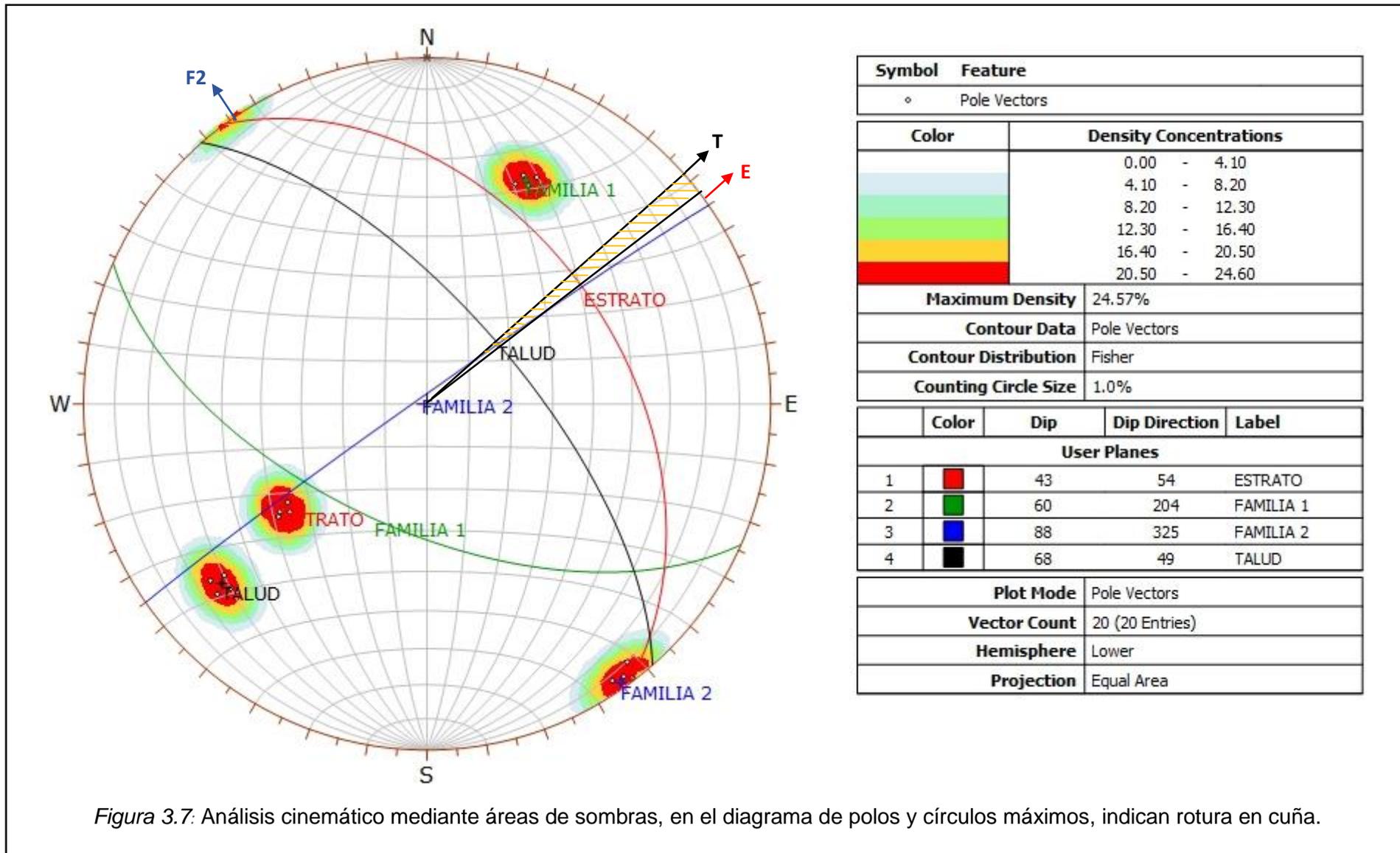
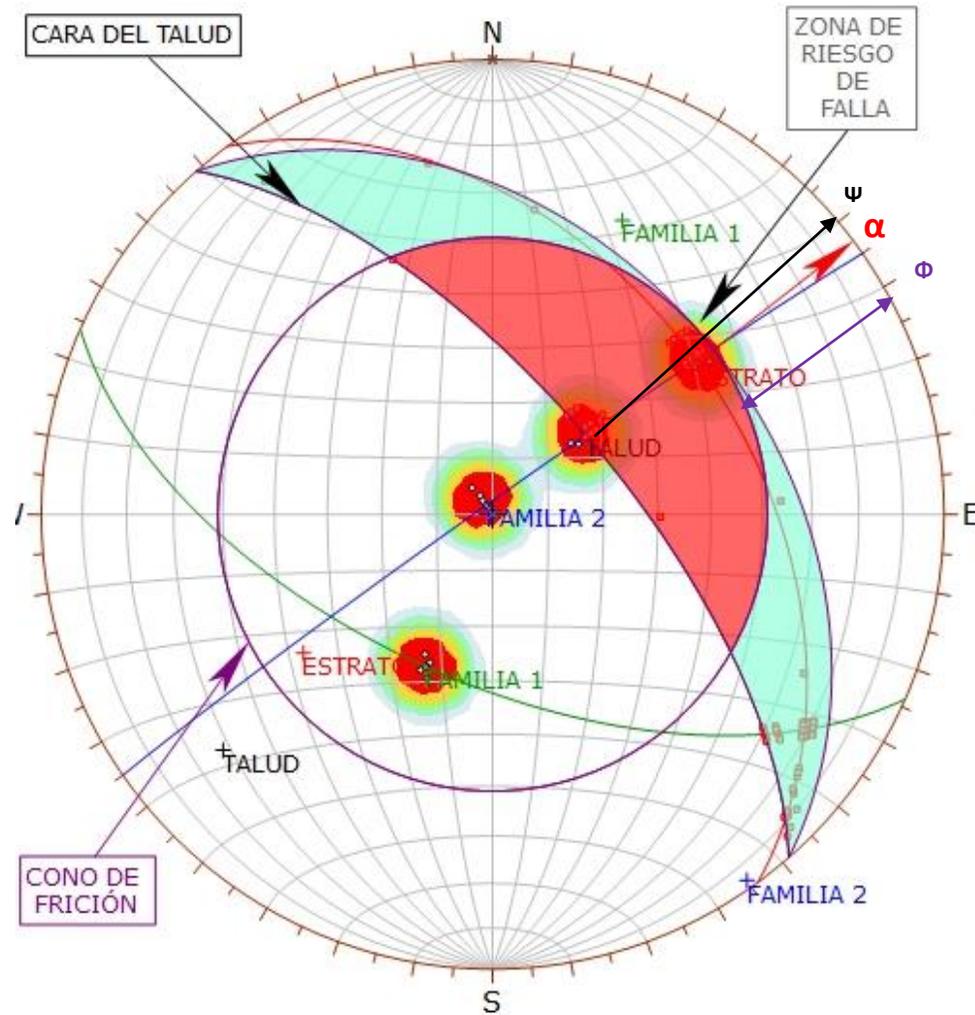


Figura 3.7: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors
•	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
(Lightest Green)	0.00 - 4.10
(Light Green)	4.10 - 8.20
(Medium Green)	8.20 - 12.30
(Yellow-Green)	12.30 - 16.40
(Yellow)	16.40 - 20.50
(Red)	20.50 - 24.60

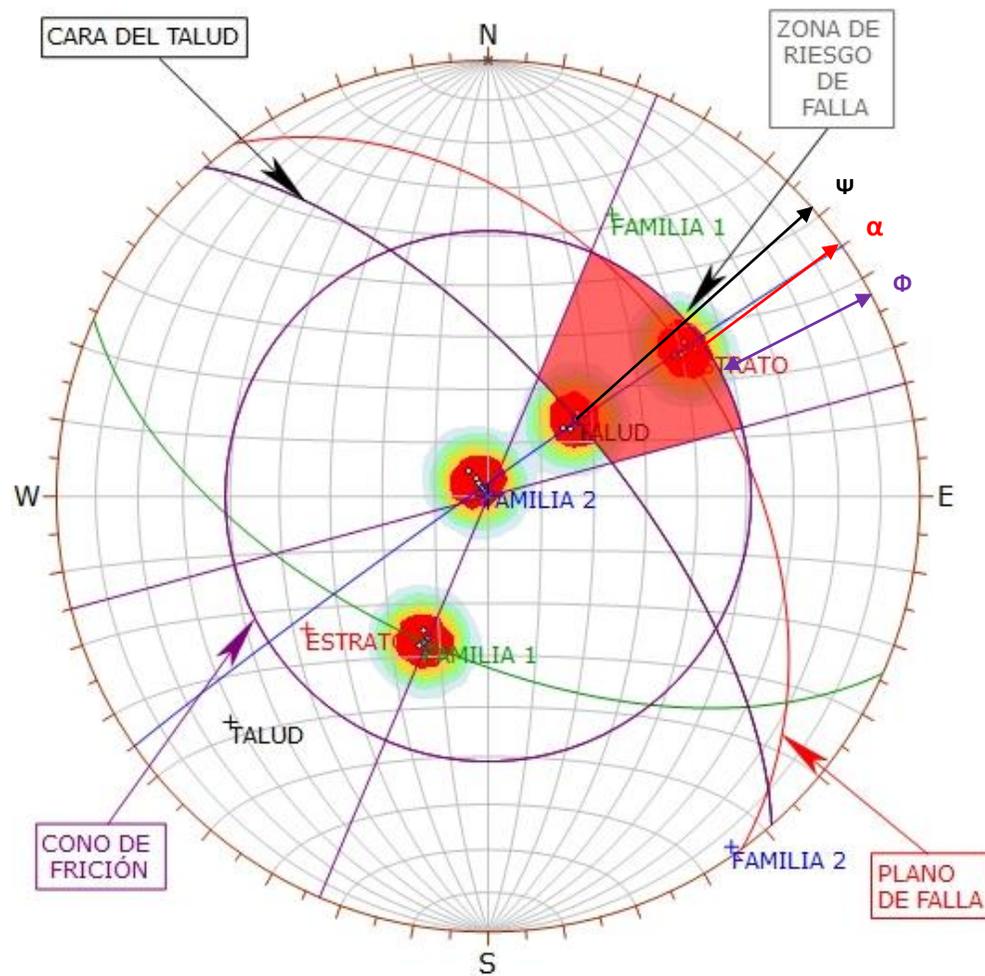
Maximum Density	24.53%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	68
Slope Dip Direction	49
Friction Angle	39°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	101	190	53.16%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	190
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.8: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
(Light Blue)	0.00 - 4.10
(Light Green)	4.10 - 8.20
(Green)	8.20 - 12.30
(Yellow)	12.30 - 16.40
(Orange)	16.40 - 20.50
(Red)	20.50 - 24.60

Maximum Density	24.53%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	68
Slope Dip Direction	49
Friction Angle	39°
Lateral Limits	26°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	8	20	40.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.9: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.

Análisis Slide v.6

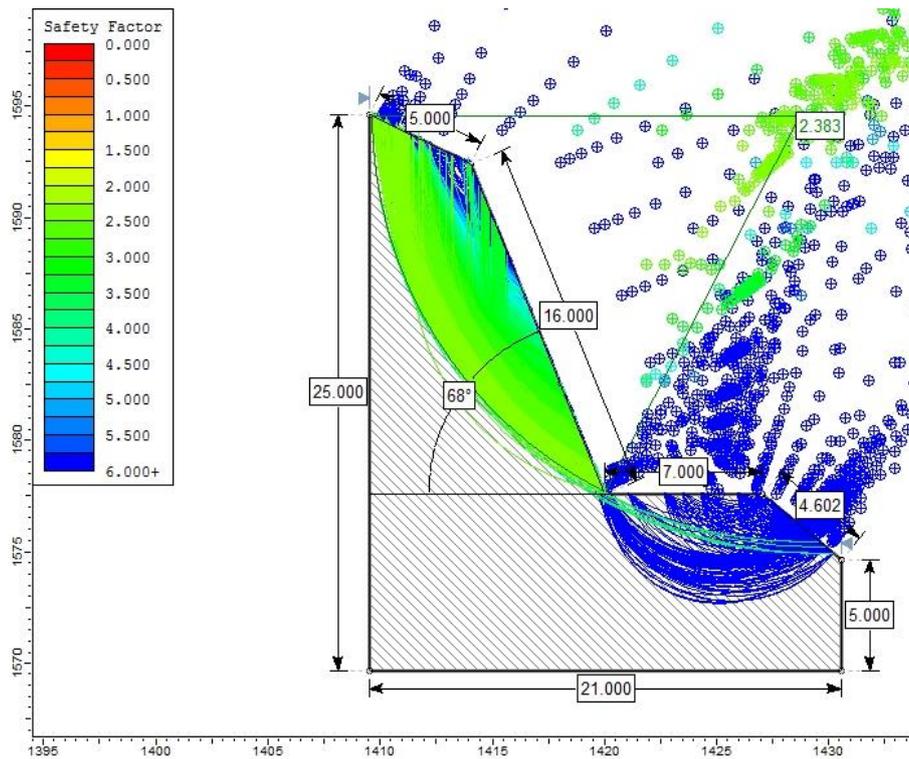


Figura 3.10: Análisis Slide en condiciones naturales.

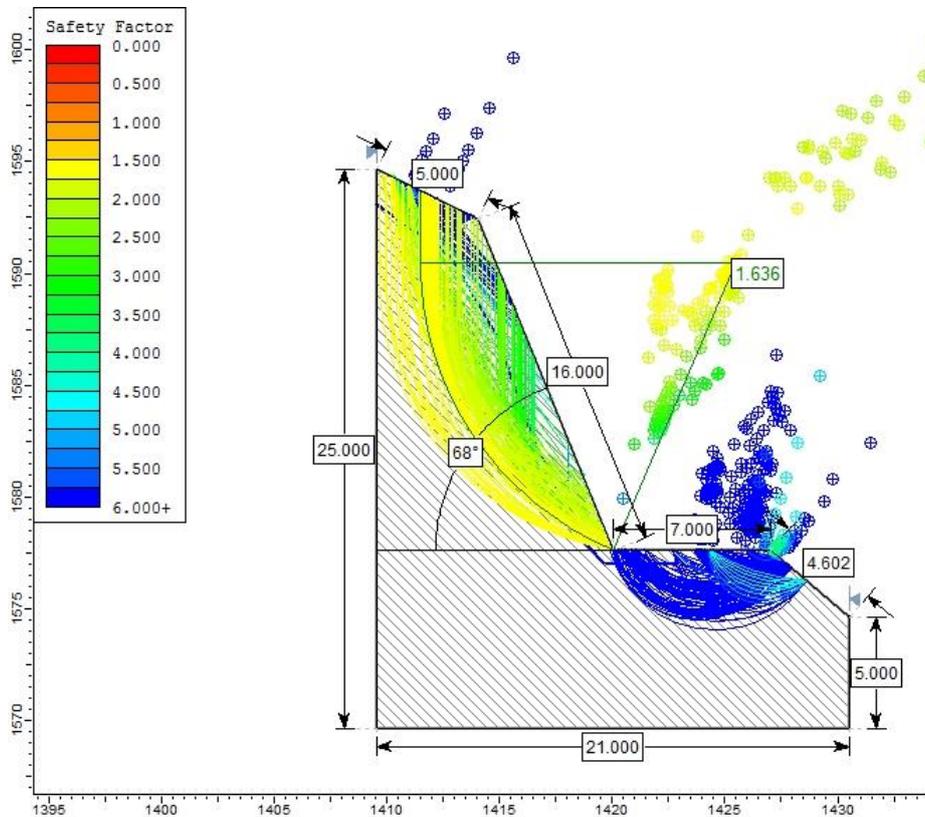


Figura 3.11: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

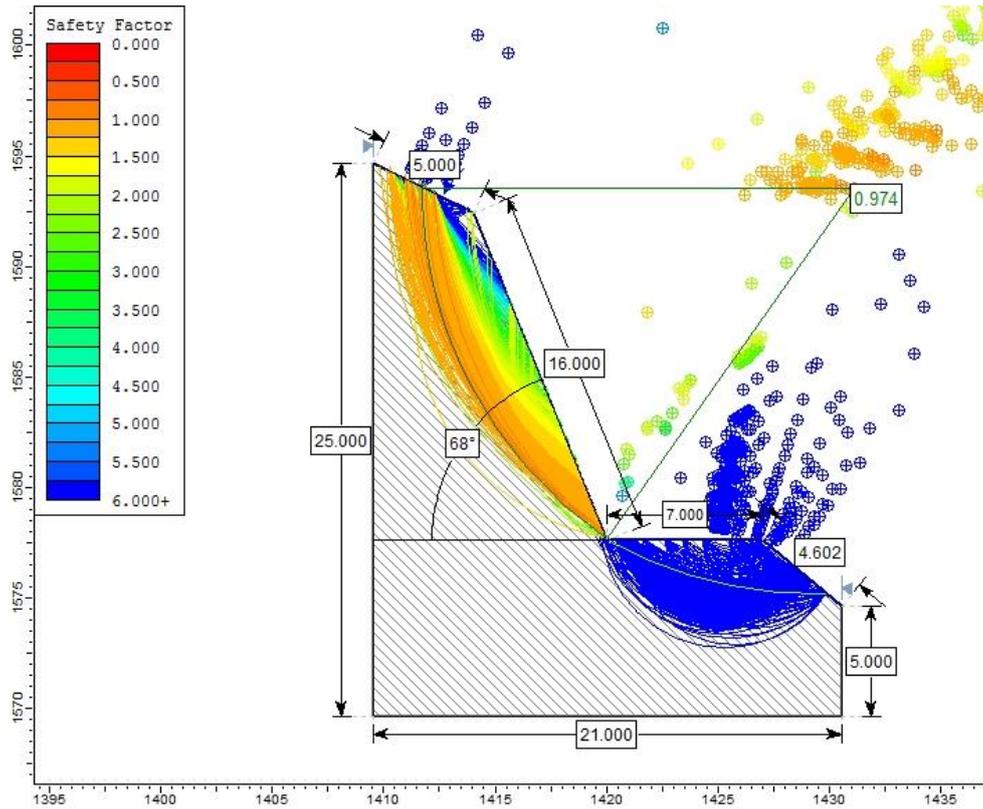


Figura 3.12: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

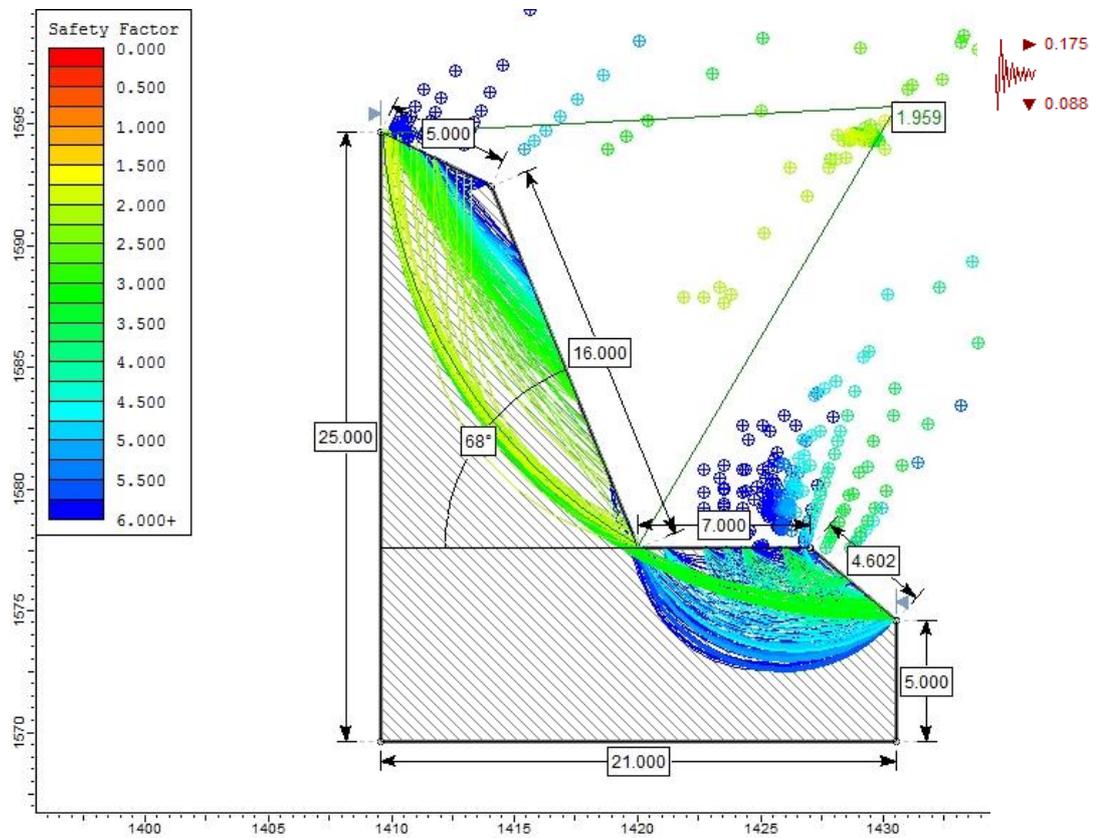


Figura 3.13: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

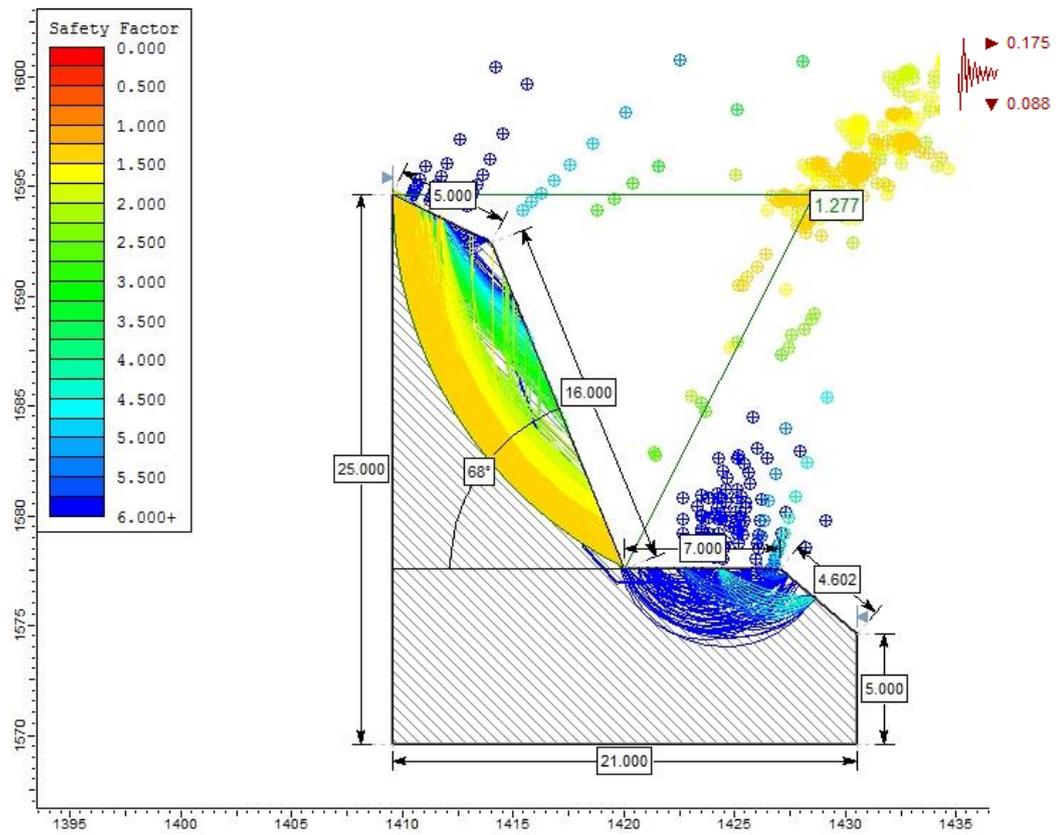


Figura 3.14: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

3.9.2 TRAMO CRÍTICO 02 – PROGRESIVAS Km 141+424 - Km 141+474

Está constituido por calizas mudstone que se meteoriza a tonos blanquecinos o gris claros, perteneciente a la Formación Cajamarca (K_S -ca), con planos de estratificación como se muestra en la Tabla 3.10, conformando tres familias de discontinuidades moderadamente meteorizado y el estrato buzando a favor del talud; Encontramos deslizamientos y desprendimientos constantes de rocas, generados por la precipitación y sismicidad, los cuales lo inestabilizan y erosionan de forma planar con respecto a su discontinuidad critica.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	749776	9274330	2140 m.s.n.m



Foto 3.23: Afloramiento de calizas de la Fm. Cajamarca en las progresivas Km 141+424 - Km 141+474.

Tabla 3.10: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 02.

LITOLOGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN		
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Calizas / Cajamarca	1 = Fresco	1 = Alto	1 = Bloq. regular	ESTRATO	58	59
				FAMILIA 1	78	268
				FAMILIA 2	76	10
	2 = Leve	2 = Medio	2 = Bloq. Irregular	GEOMETRÍA DEL TALUD		
				ALTURA	26 m	
	3 = Moderado	3 = Bajo	3 = Bloq. y Capas	PIE	37 m	
				D	79	
	4 = Alto		4 = Frac. Intenso	DD	47	
				3	2	3



Foto 3.24: Perfil del talud en la progresiva Km 141+424.

Tabla 3.11: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 02.

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a Compresión Uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	10	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	0
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	7	
VALOR TOTAL RMR						47	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque sus discontinuidades son favorables; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas o discontinuidades. Como se muestra en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Estimación del GSI del talud crítico 02.

ESTIMACIÓN DEL GSI						
CÁLCULO DEL RQD						
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$			ND	L(m)	λ	RQD
			56	4	14	72.84
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)						
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉	
2	0	5	0	3	10	
GSI=1.5JCOND₈₉ + RQD/2				GSI = 44.59		

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 02 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.15.

Tabla 3.13: Propiedades geomecánicas del talud crítico 02.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CAJAMARCA					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	90 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.381	
GSI	44.59		s	0.000325	
mi	8		a	0.508	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.3491	Mpa
Ei	58500 Mpa		ϕ	47.48°	
MR	650	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.077	Mpa
			sigc	1.519	Mpa
			sigcm	7.167	Mpa
			Erm	4464.227	Mpa

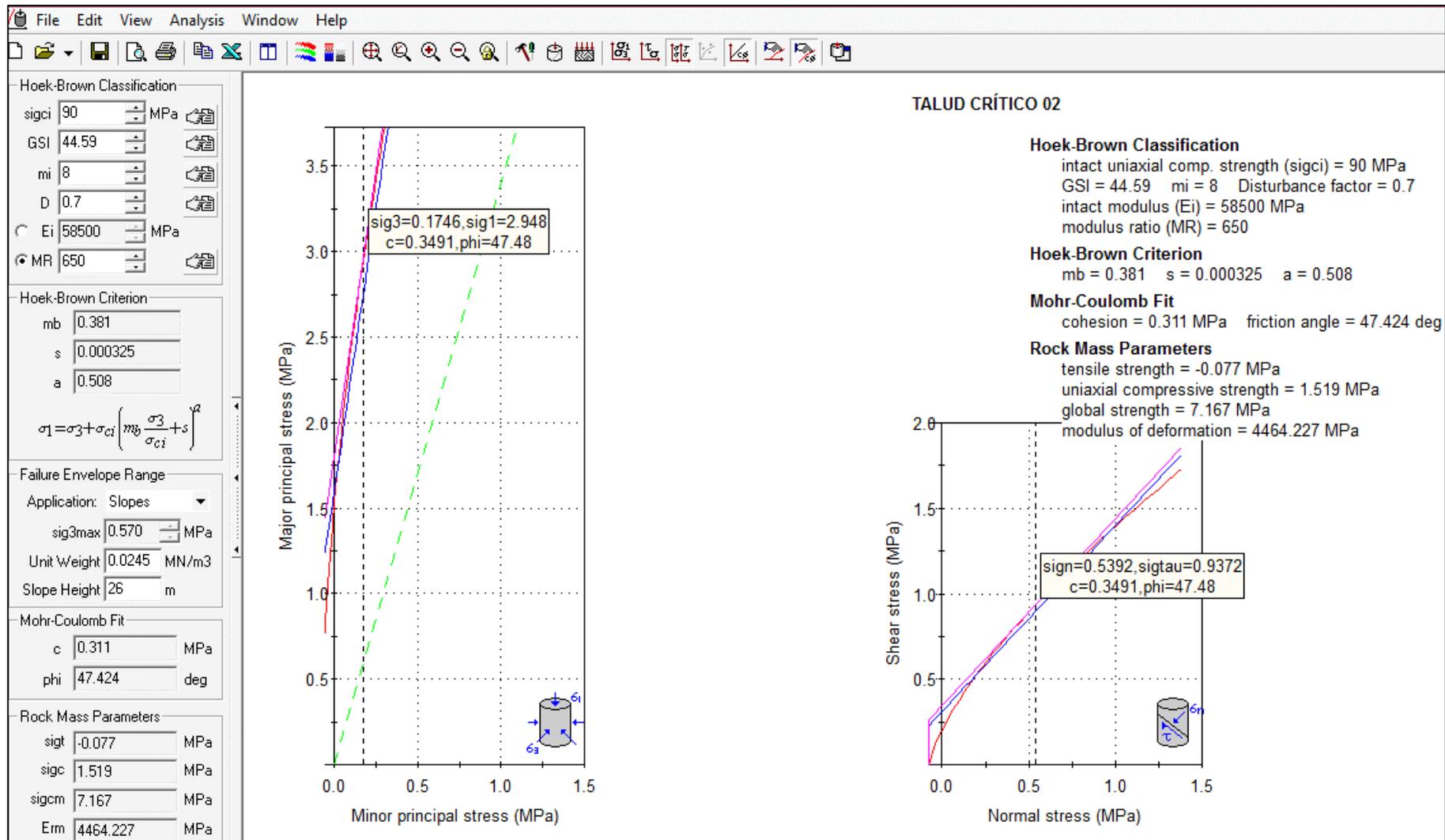
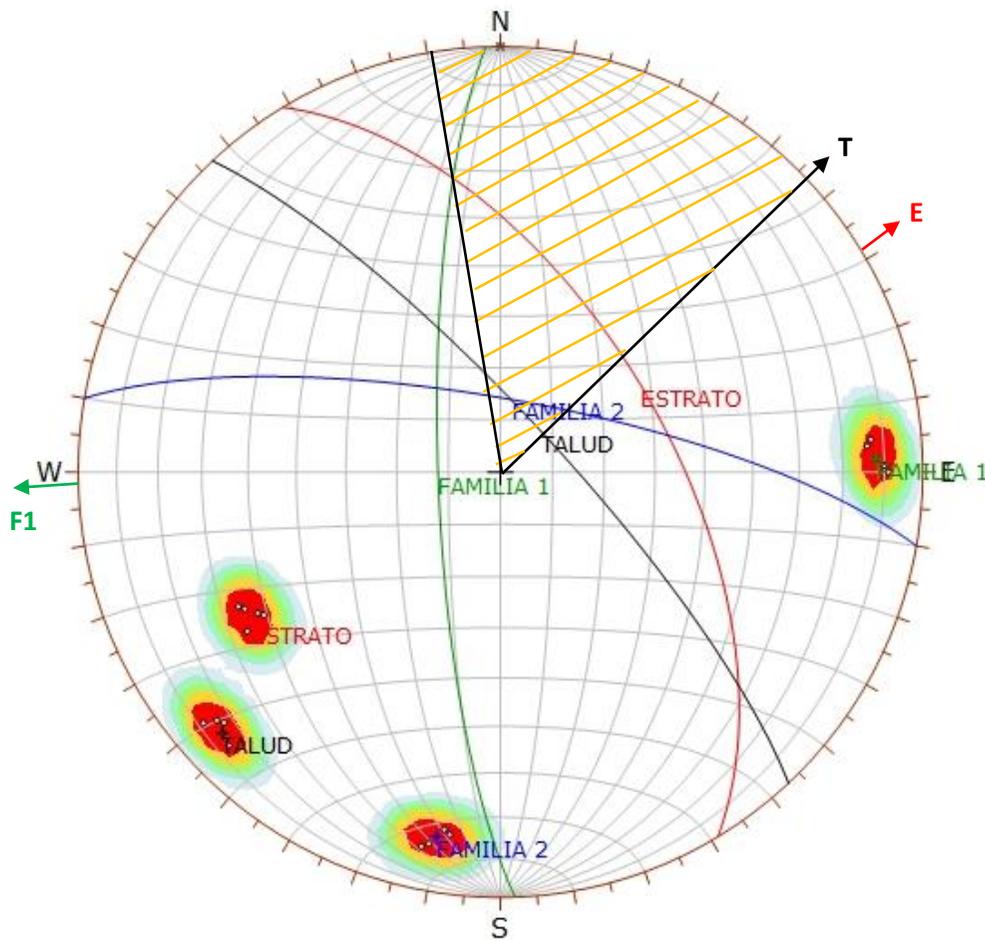


Figura 3.15: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Cajamarca.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors

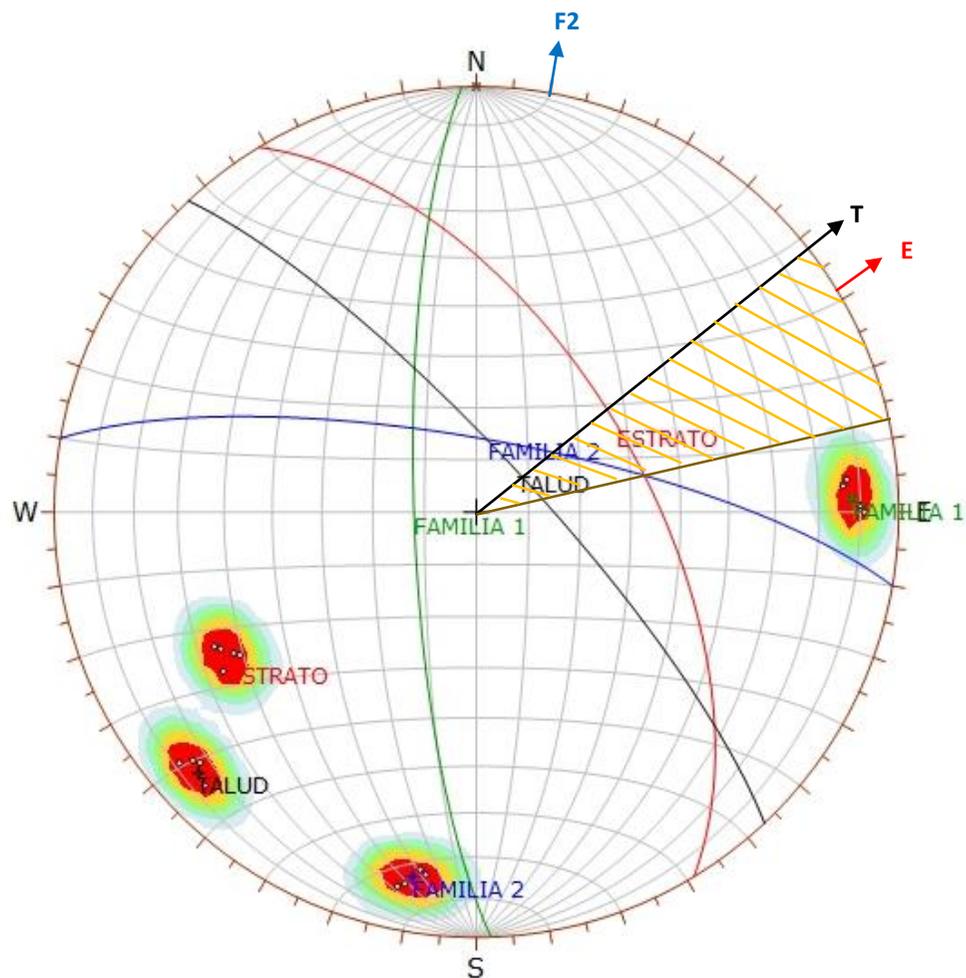
Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.10
	4.10 - 8.20
	8.20 - 12.30
	12.30 - 16.40
	16.40 - 20.50
	20.50 - 24.60

Maximum Density	24.41%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		58	59	ESTRATO
2		78	268	FAMILIA 1
3		76	10	FAMILIA 2
4		79	47	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.16: Análisis cinemático en el diagrama de polos y círculos máximos, mediante áreas de sombras, indican rotura en cuña.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors

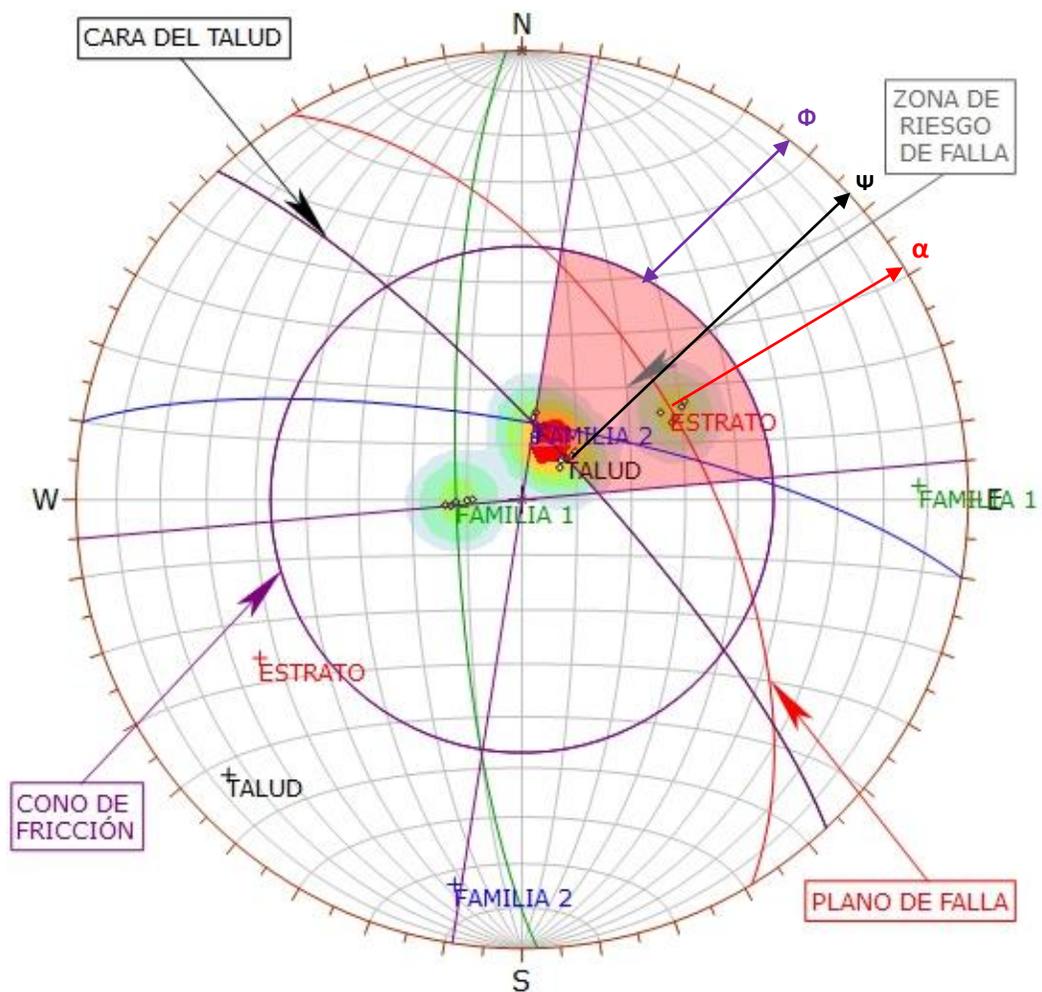
Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.10
	4.10 - 8.20
	8.20 - 12.30
	12.30 - 16.40
	16.40 - 20.50
	20.50 - 24.60

Maximum Density	24.41%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	58	59	ESTRATO
2	■	78	268	FAMILIA 1
3	■	76	10	FAMILIA 2
4	■	79	47	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.17: Análisis cinemático en el diagrama de polos y círculos máximos, mediante áreas de sombras indican rotura planar.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 7.40
	7.40 - 14.80
	14.80 - 22.20
	22.20 - 29.60
	29.60 - 37.00
	37.00 - 44.40

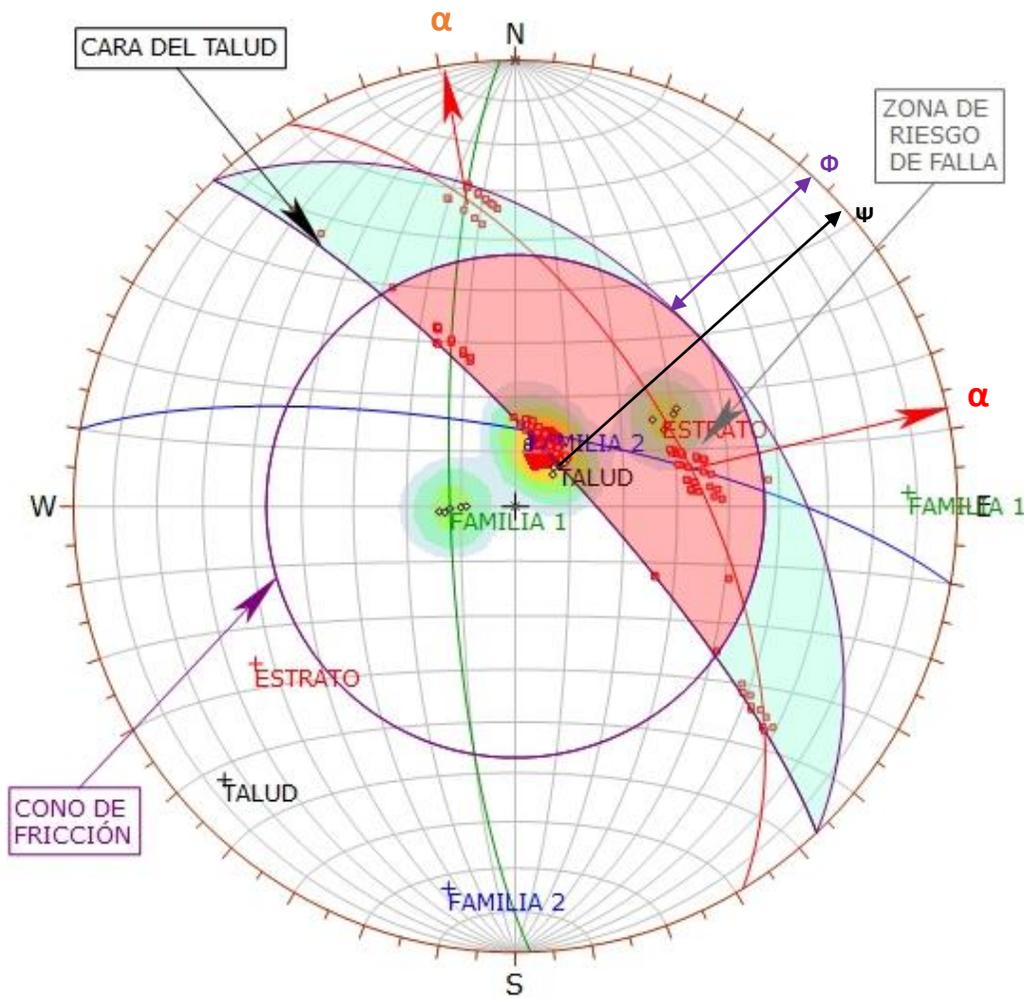
Maximum Density	44.30%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	79
Slope Dip Direction	47
Friction Angle	43°
Lateral Limits	38°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	10	20	50.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.18: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.



Symbol	Feature
○	Dip Vectors
■	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
Light Blue	0.00 - 7.40
Light Green	7.40 - 14.80
Yellow-Green	14.80 - 22.20
Yellow	22.20 - 29.60
Orange	29.60 - 37.00
Red	37.00 - 44.40

Maximum Density	44.30%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	79
Slope Dip Direction	47
Friction Angle	43°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	94	190	49.47%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	190
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.19: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.

Análisis Slide v.6

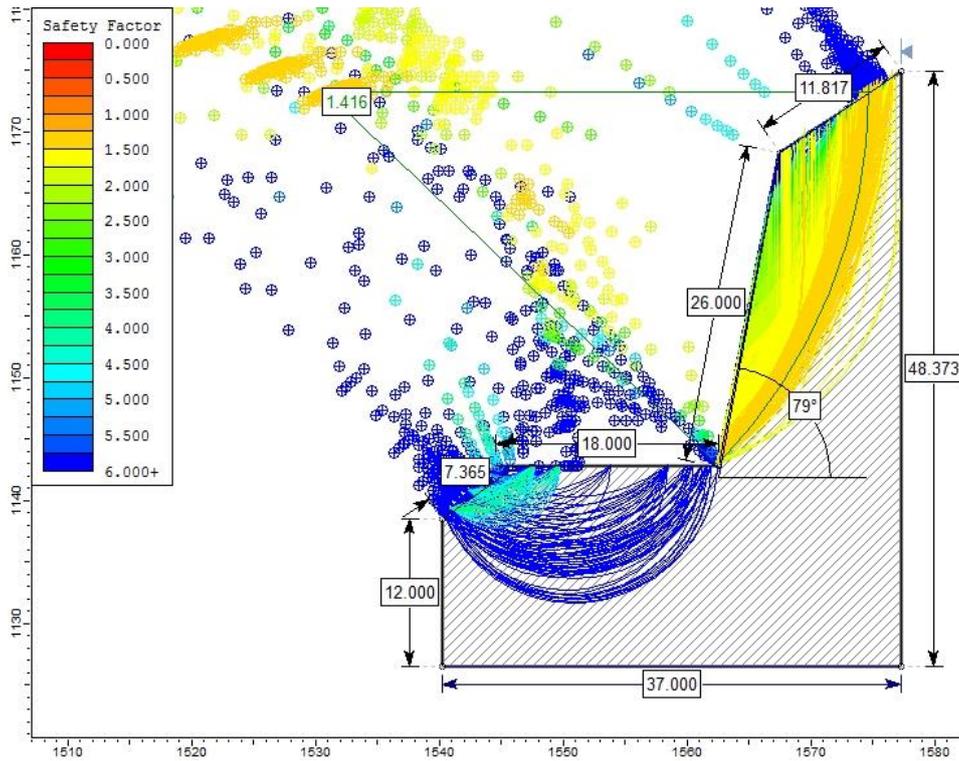


Figura 3.20: Análisis Slide en condiciones naturales.

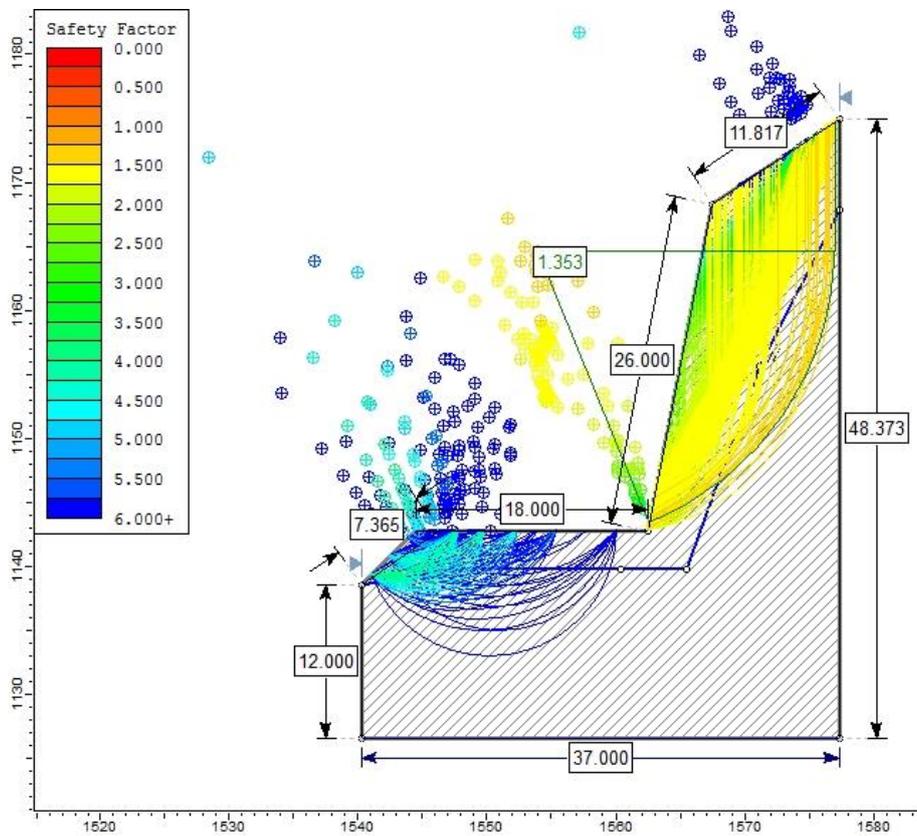


Figura 3.21. Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

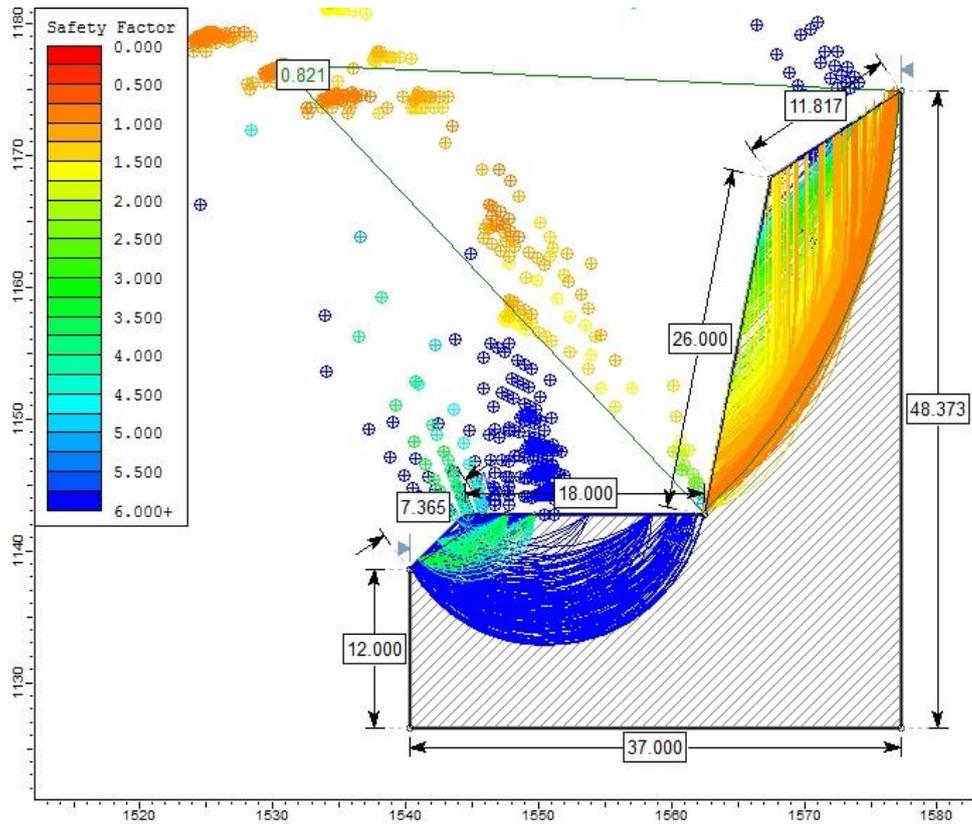


Figura 3.22: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

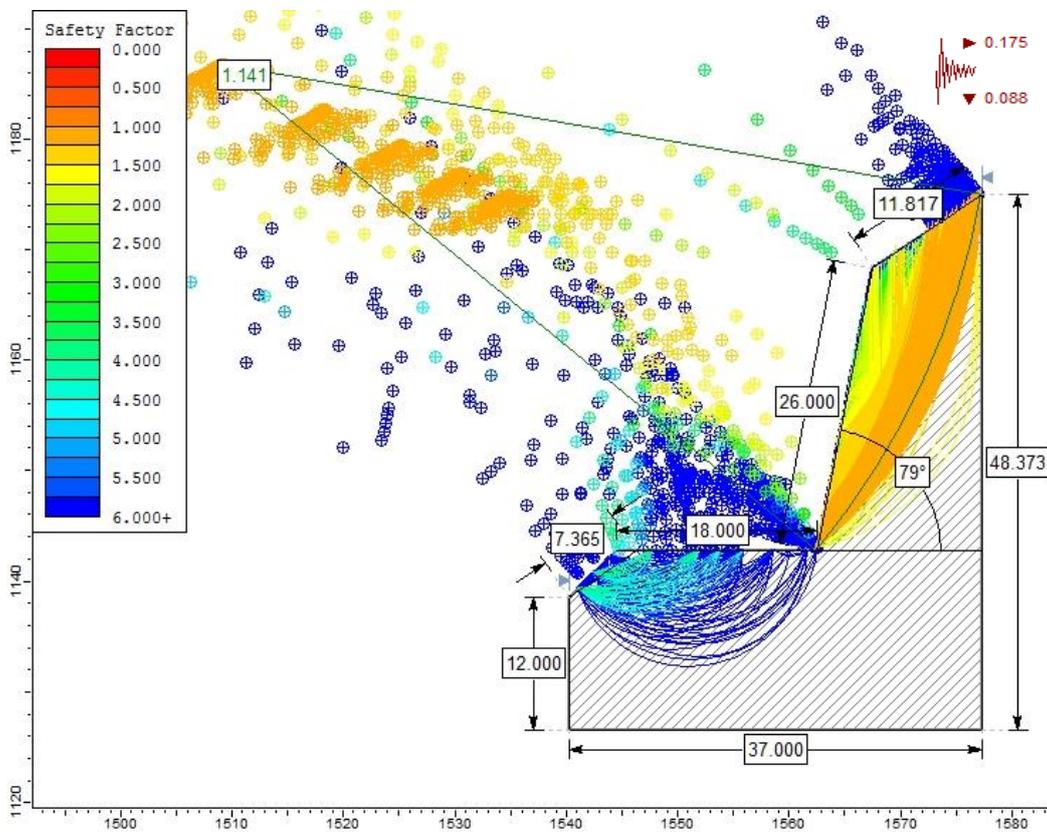


Figura 3.23: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

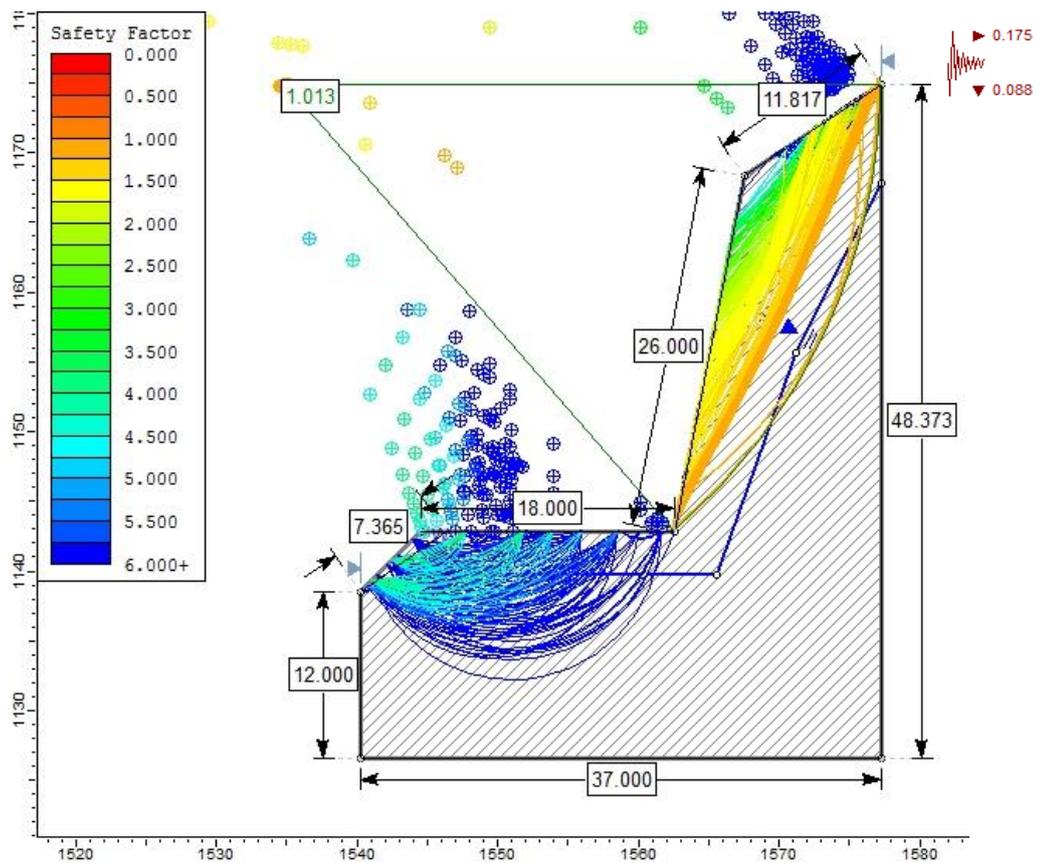


Figura 3.24: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

3.9.3 TRAMO CRÍTICO 03 – PROGRESIVAS Km 140+744 - Km 140+794

Está compuesto por calizas mudstone perteneciente a la Formación Cajamarca (K_S -ca) con planos de estratificación como se muestra en la Tabla 3.14, conformando tres familias de discontinuidades; moderadamente meteorizados y el estrato buzando a favor del talud; Se evidencian deslizamientos y desprendimientos constantes de rocas, generados por la precipitación y sismicidad, los cuales lo inestabilizan el talud.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	749375	9274846	2117 m.s.n.m



Foto 3.25: Afloramiento de calizas de la Fm. Cajamarca, en las progresivas Km 140+744 - Km 140+794, de bloques irregulares.

Tabla 3.14: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 03.

LITOLÓGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN		
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Calizas / Cajamarca	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	43	60
				FAMILIA 1	62	195
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	64	260
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	12 m	
				PIE	42 m	
	4=Alto		4= Frac. Intenso	D	66	
				DD	64	
3	2	3				



Foto 3.26: Perfil del talud en la progresiva Km 140+744.

Tabla 3.15: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 03.

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	10	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	0
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
VALOR TOTAL RMR						50	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque las discontinuidades son favorables; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas. Como se muestra en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16: Estimación del GSI del talud crítico 03.

ESTIMACIÓN DEL GSI						
CÁLCULO DEL RQD						
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$			ND	L(m)	λ	RQD
			55	4	13.75	60.04
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)						
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉	
2	0	6	0	3	11	
GSI=1.5JCOND₈₉ + RQD/2				GSI = 46.52		

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 03 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.25.

Tabla 3.17: Propiedades geomecánicas del talud crítico 03.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CAJAMARCA					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	85 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.477	
GSI	46.52		s	0.00043	
mi	9		a	0.507	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.2894	Mpa
Ei	59500 Mpa		ϕ	53.35°	
MR	700	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.077	Mpa
			sigc	1.667	Mpa
			sigcm	7.630	Mpa
			Erm	5117.869	Mpa

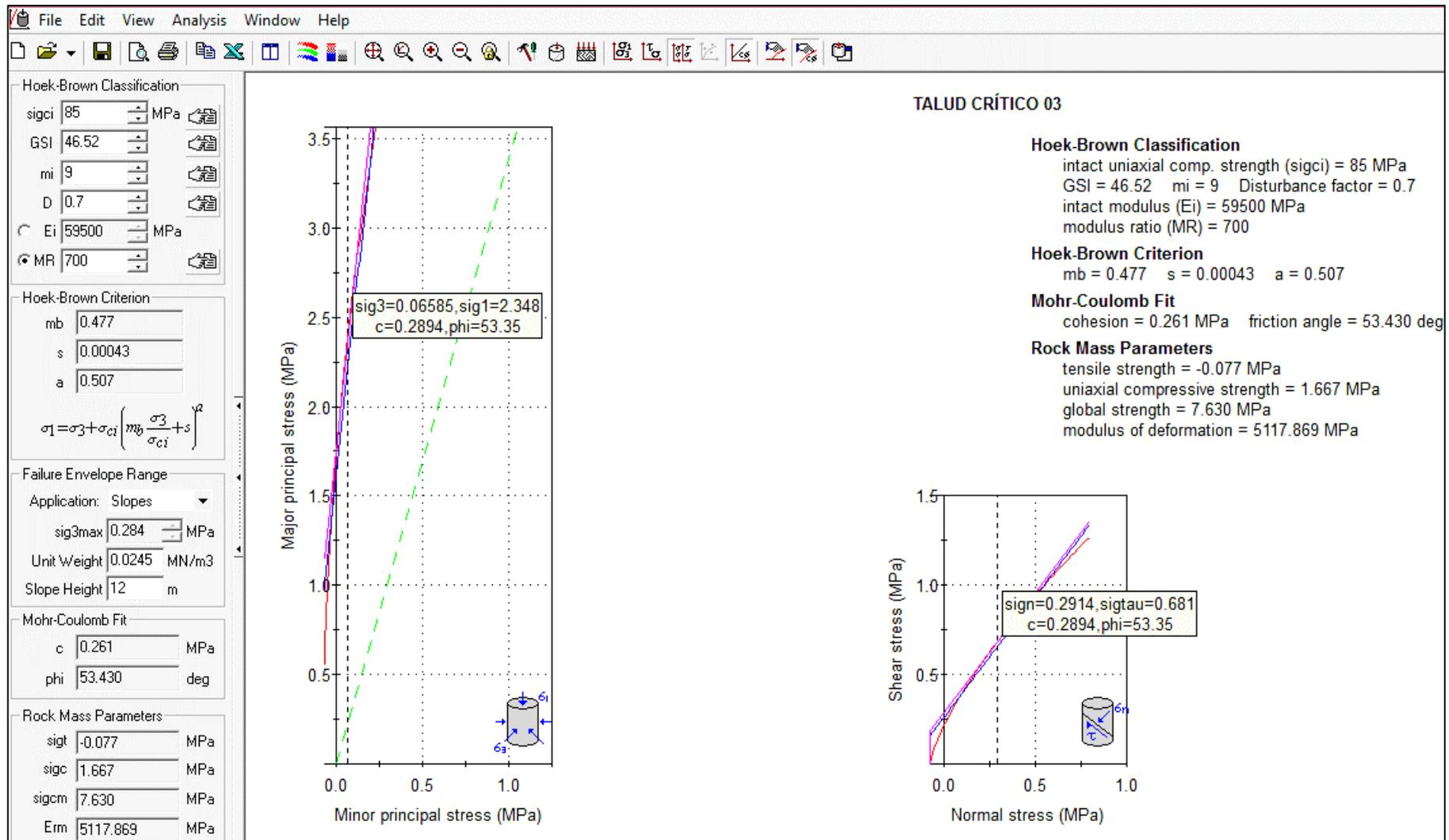
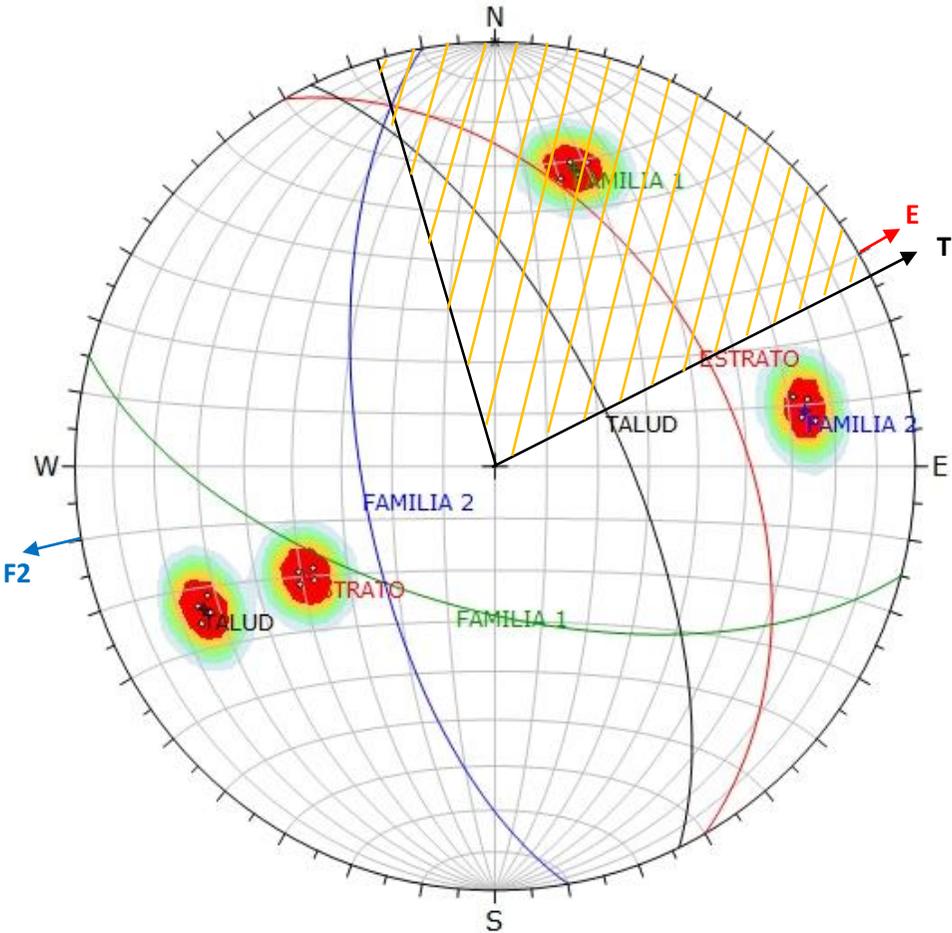


Figura 3.25: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Cajamarca.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors

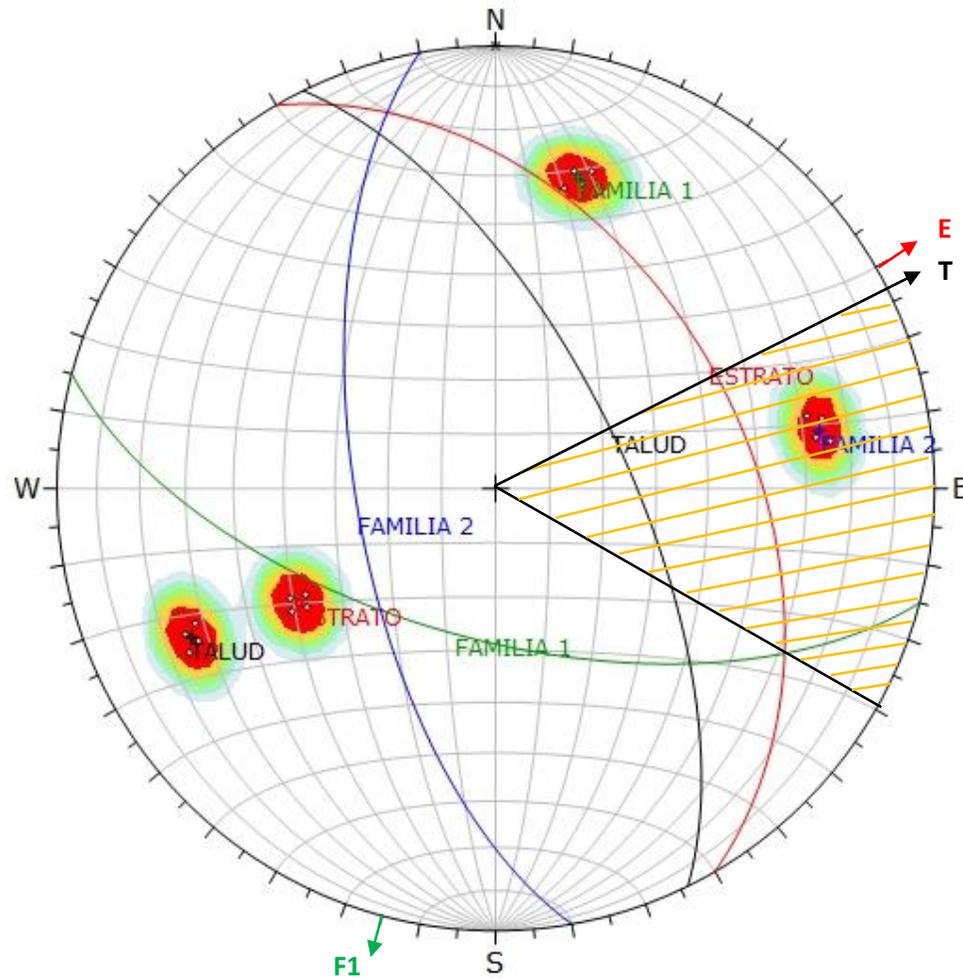
Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.10
	4.10 - 8.20
	8.20 - 12.30
	12.30 - 16.40
	16.40 - 20.50
	20.50 - 24.60

Maximum Density	24.43%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		43	60	ESTRATO
2		62	195	FAMILIA 1
3		64	260	FAMILIA 2
4		66	64	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.26: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican de rotura planar.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors

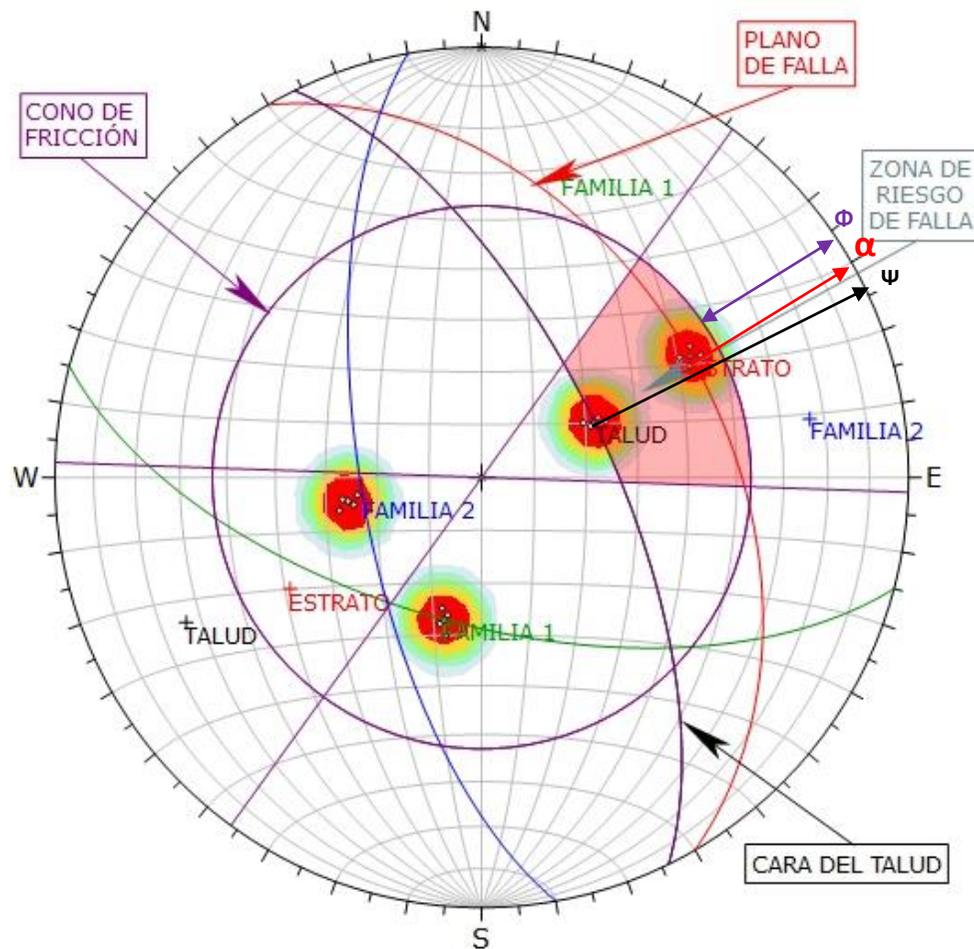
Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.10
	4.10 - 8.20
	8.20 - 12.30
	12.30 - 16.40
	16.40 - 20.50
	20.50 - 24.60

Maximum Density	24.43%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	43	60	ESTRATO
2	■	62	195	FAMILIA 1
3	■	64	260	FAMILIA 2
4	■	66	64	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.27: Análisis cinemático mediante áreas de sombras en el diagrama de polos y círculos máximos, indican de rotura en cuña.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
Light Blue	0.00 - 4.20
Light Green	4.20 - 8.40
Yellow-Green	8.40 - 12.60
Yellow	12.60 - 16.80
Orange	16.80 - 21.00
Red	21.00 - 25.20

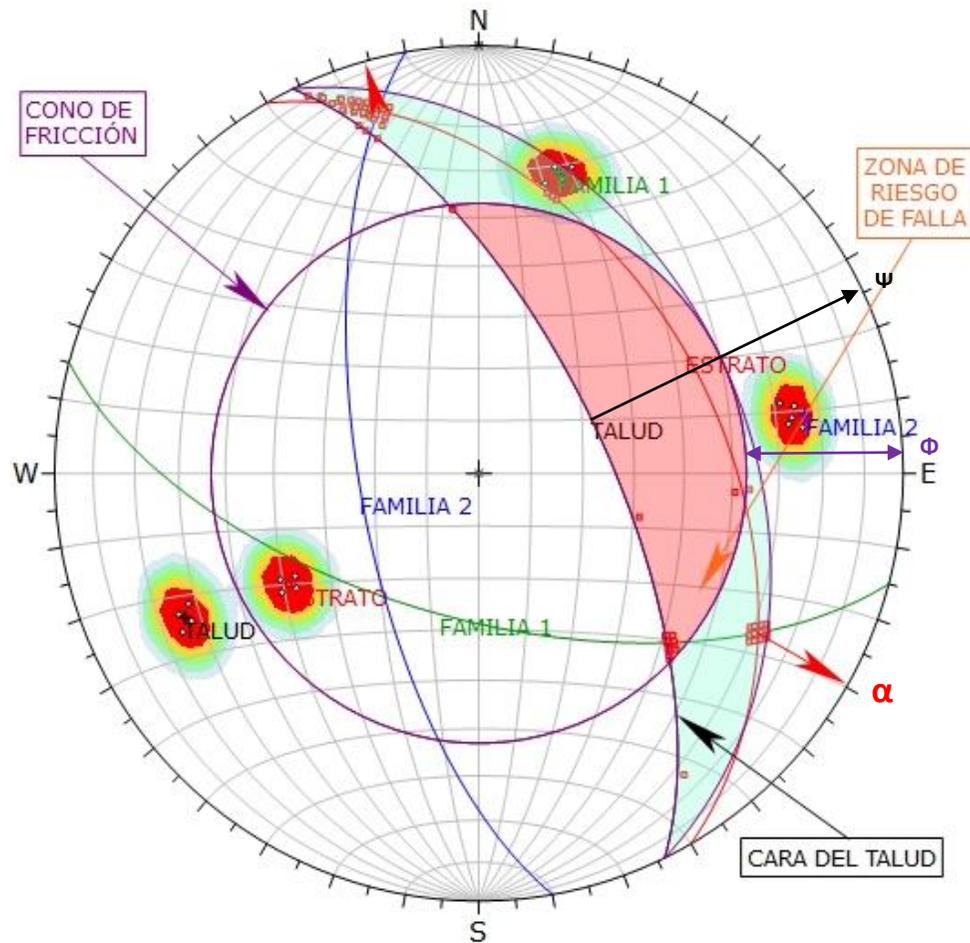
Maximum Density	24.63%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding		
Slope Dip	66		
Slope Dip Direction	64		
Friction Angle	37°		
Lateral Limits	28°		

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	8	20	40.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.28: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors
◻	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
Light Blue	0.00 - 4.10
Light Green	4.10 - 8.20
Yellow-Green	8.20 - 12.30
Yellow	12.30 - 16.40
Orange	16.40 - 20.50
Red	20.50 - 24.60

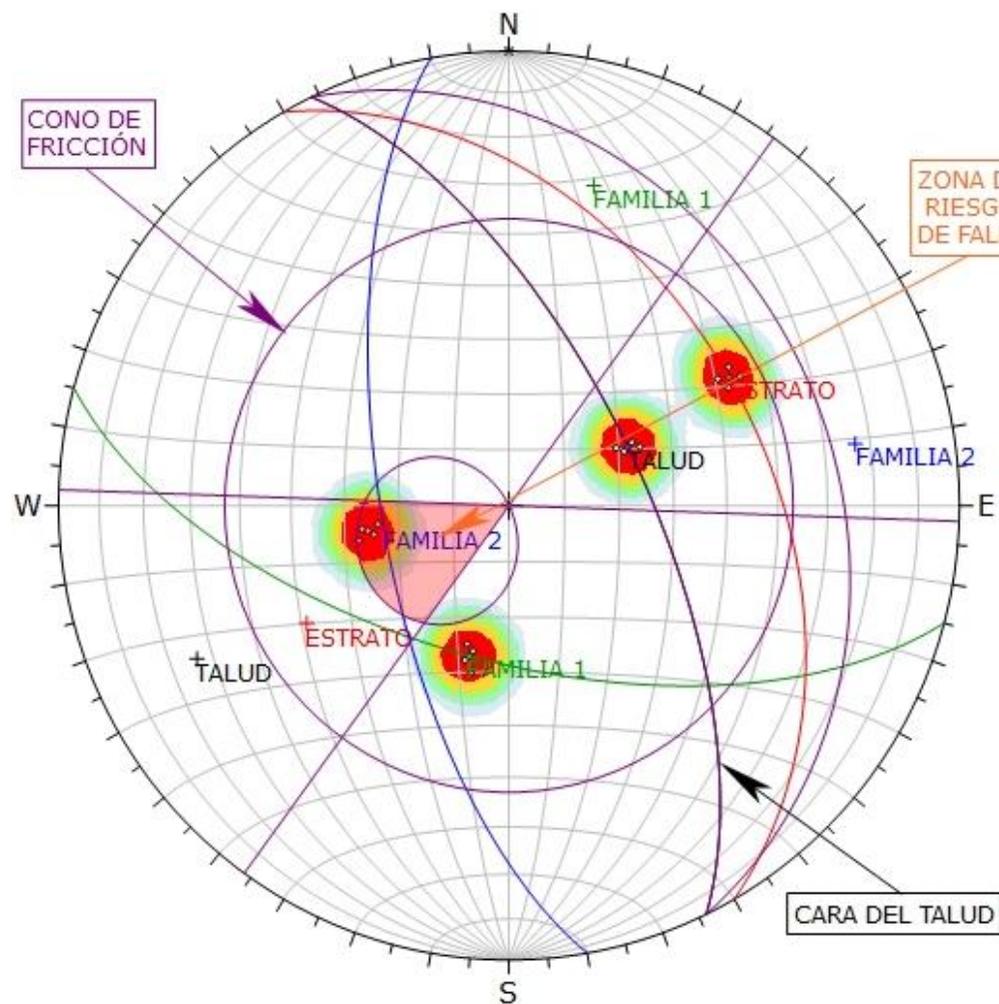
Maximum Density	24.43%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	66
Slope Dip Direction	64
Friction Angle	37°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	95	190	50.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	190
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.29: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.20
	4.20 - 8.40
	8.40 - 12.60
	12.60 - 16.80
	16.80 - 21.00
	21.00 - 25.20

Maximum Density	24.63%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Flexural Toppling
Slope Dip	66
Slope Dip Direction	64
Friction Angle	37°
Lateral Limits	28°

	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	5	20	25.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.30: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de volcamiento flexural.

Análisis Slide v.6

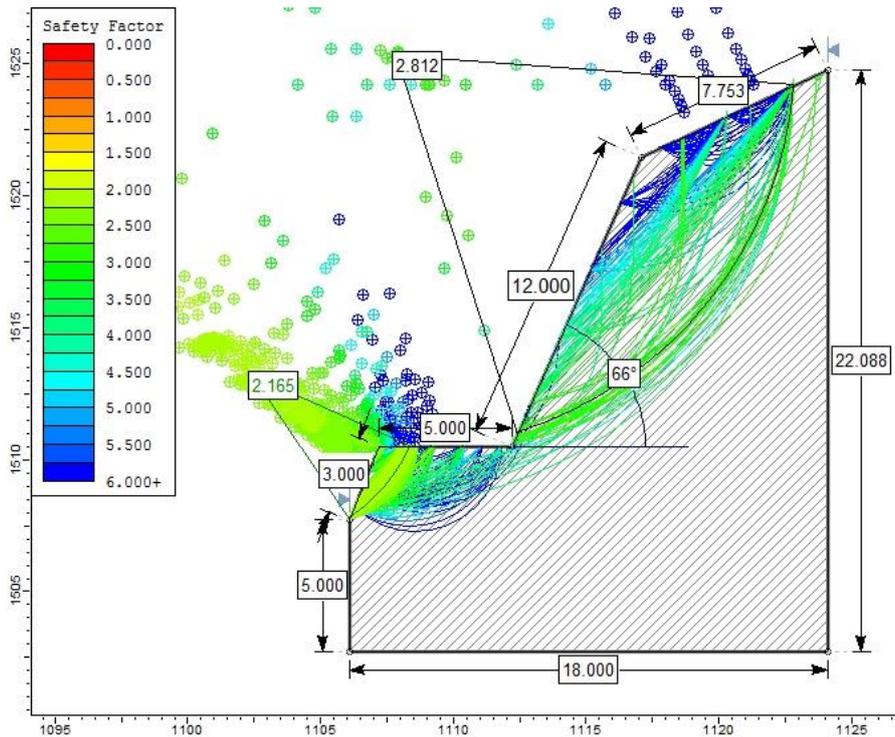


Figura 3.31: Análisis Slide en condiciones naturales.

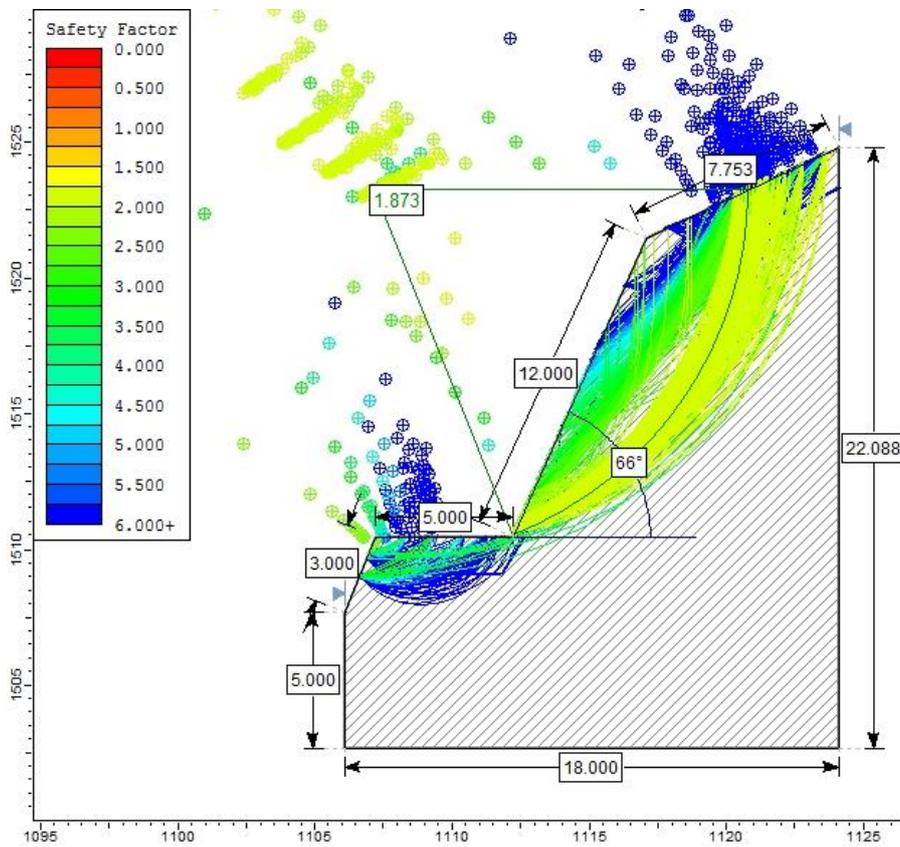


Figura 3.32: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

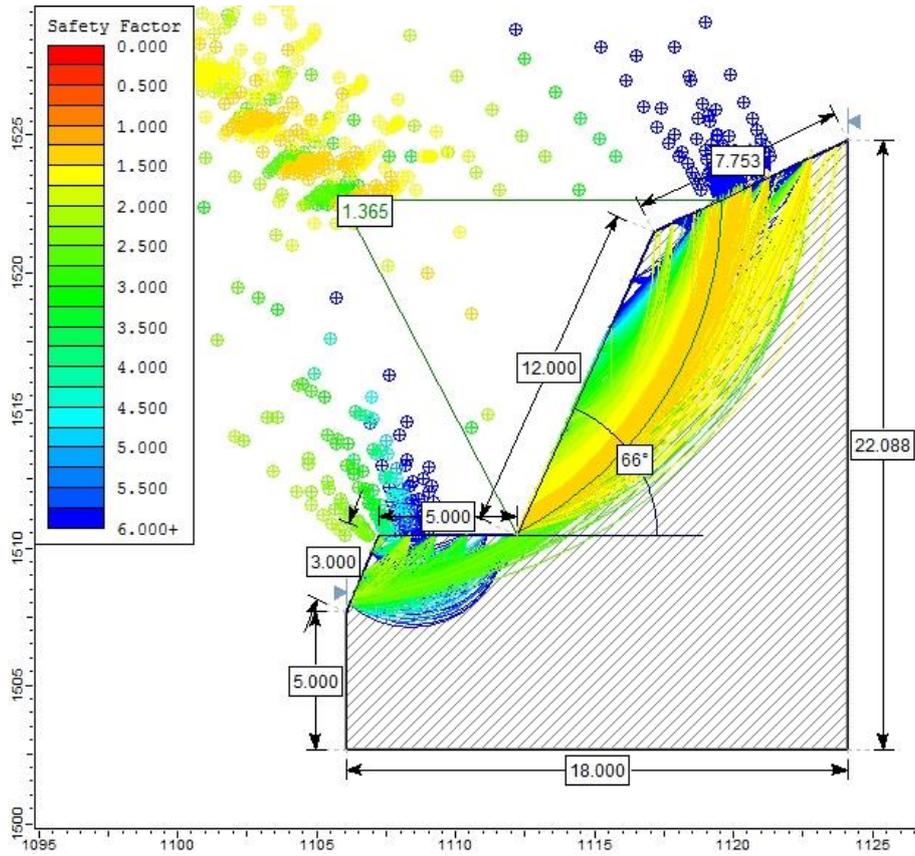


Figura 3.33: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

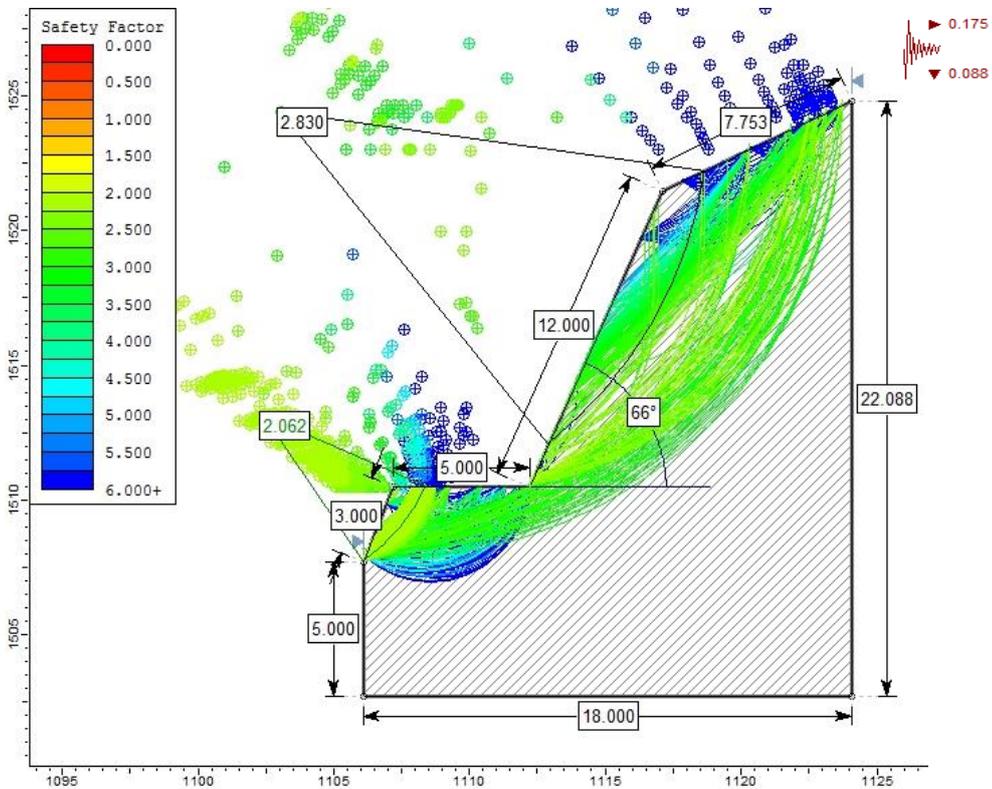


Figura 3.34: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

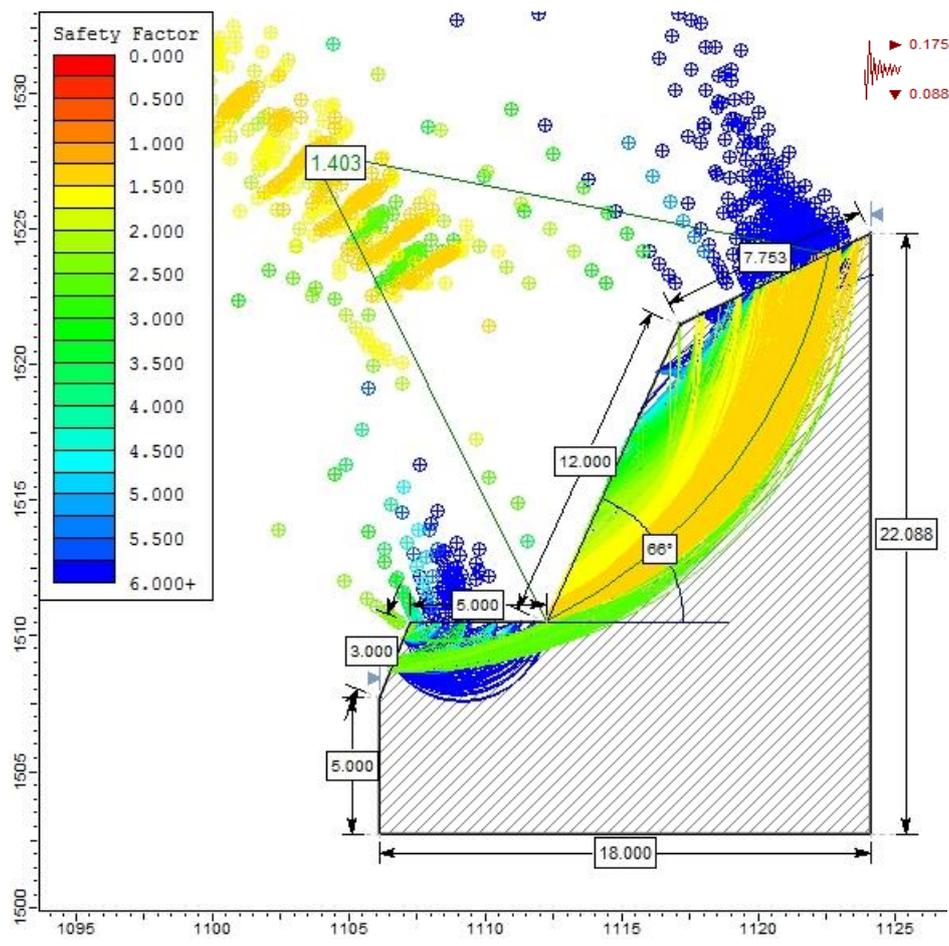


Figura 3.35: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

3.9.4 TRAMO CRÍTICO 04 – PROGRESIVAS Km 139+863 - Km 139+913

Está constituido por calizas wackstone perteneciente al Grupo Quilquiñan (K_S-q) con planos de estratificación como se muestra en la Tabla 3.18, conformando tres familias de discontinuidades; moderadamente meteorizados y el estrato buzando a favor del talud. Encontramos deslizamientos y desprendimientos constantes de rocas de la parte media del talud, siendo afectadas por la precipitación y sismicidad, los cuales lo inestabilizan y erosionan en forma planar siguiendo su secuencia estratigráfica.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S	ESTE	NORTE	2109 m.s.n.m
		748702	9274800	



Foto 3.27: Afloramiento de calizas gris amarillentas en la progresiva Km 139+863 - Km 139+913.

Tabla 3.18: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 04.

LITOLOGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN			
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD	
Calizas/Grupo Quilquiñan	1 = Fresco	1 = Alto	1 = Bloq. regular	ESTRATO	48	84	
				FAMILIA 1	64	10	
	2 = Leve	2 = Medio	2 = Bloq. Irregular	FAMILIA 2	48	230	
				GEOMETRÍA DEL TALUD			
	3 = Moderado	3 = Bajo	3 = Bloq. y Capas	ALTURA	24 m		
				PIE	40 m		
	4 = Alto		4 = Frac-intenso	D	78		
				DD	75		
	3	2	2				



Foto 3.28: Perfil del talud en la progresiva Km 139+863.

Tabla 3.19: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 04.

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	10	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	0
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
VALOR TOTAL RMR						52	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque el macizo rocoso es favorable; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas. Como se muestra en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20: Estimación del GSI para el talud crítico 04.

ESTIMACIÓN DEL GSI						
CÁLCULO DEL RQD						
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$			ND	L(m)	λ	RQD
			67	5	13.4	61.27
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)						
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉	
4	0	5	0	3	12	
$GSI=1.5JCOND_{89} + RQD/2$				GSI = 48.63		

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 04 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.36.

Tabla 3.21: Propiedades geomecánicas del talud crítico 04.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL GRUPO QUILQUIÑAN					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	100 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.595	
GSI	48.63		s	0.001	
mi	11		a	0.506	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.4423	Mpa
Ei	75000 Mpa		ϕ	52.02°	
MR	750	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.098	Mpa
			sigc	2.307	Mpa
			sigcm	10.103	Mpa
			Erm	7371.906	Mpa

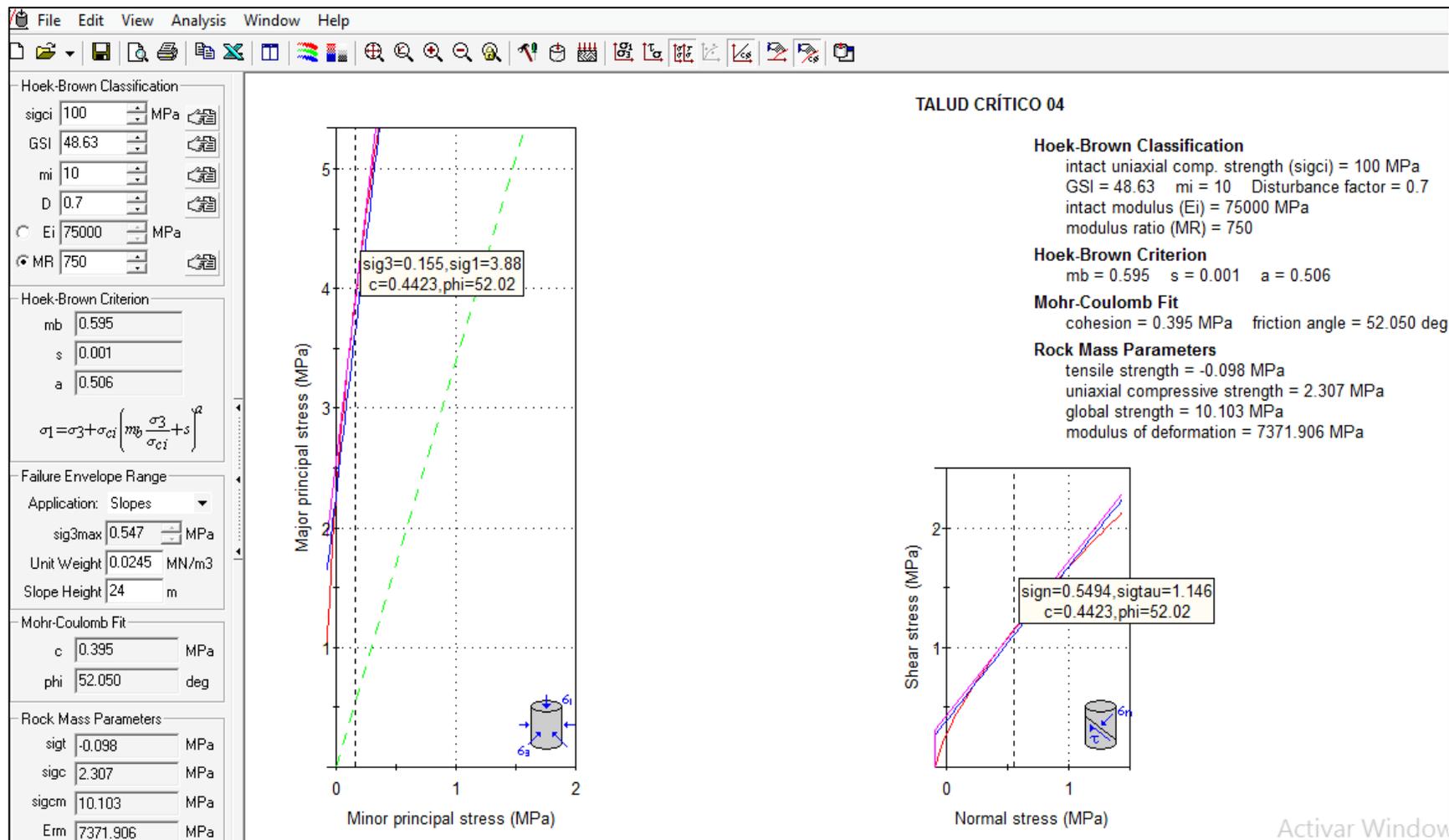


Figura 3.36: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas del Grupo Quilquiñan.

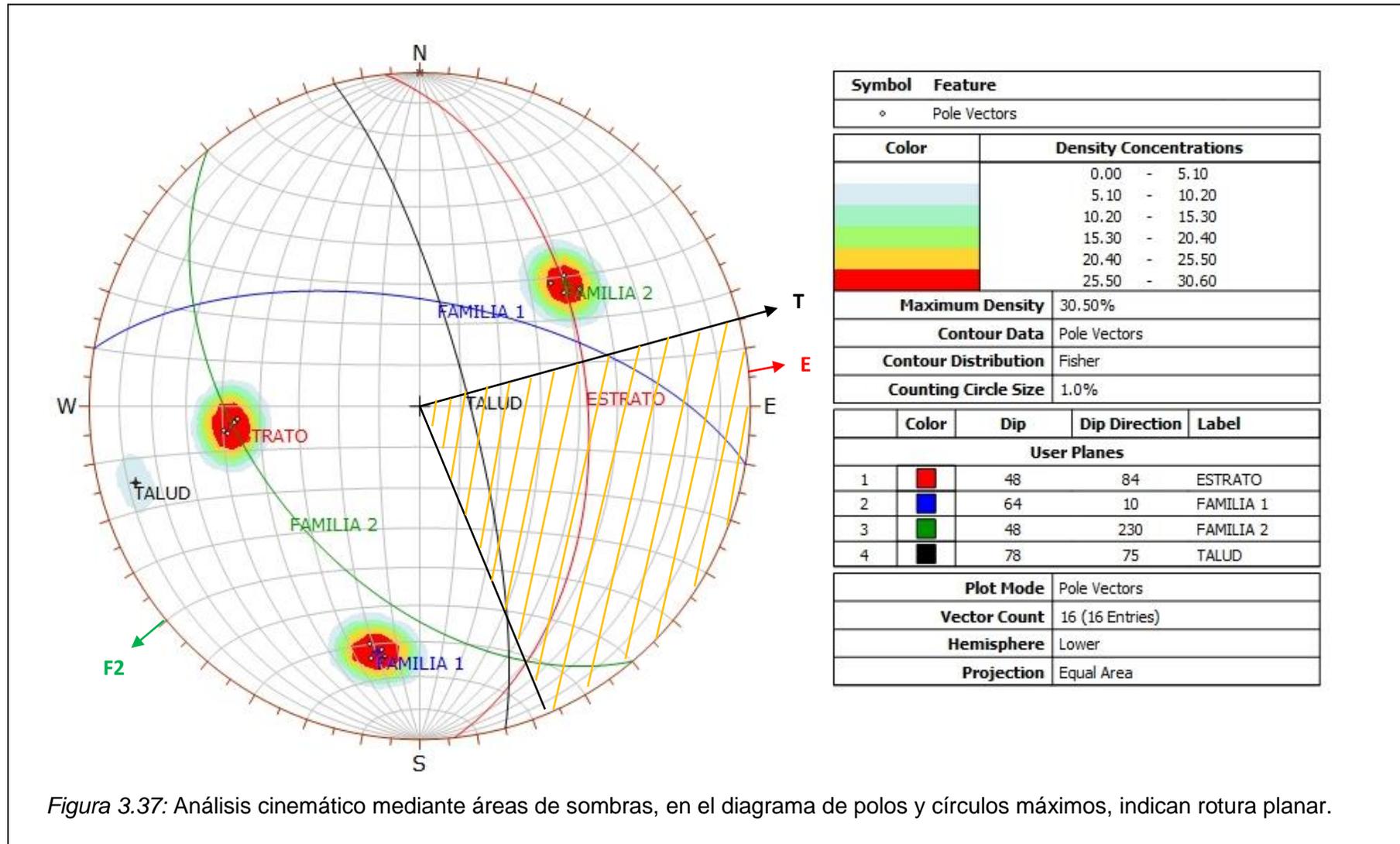


Figura 3.37: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.

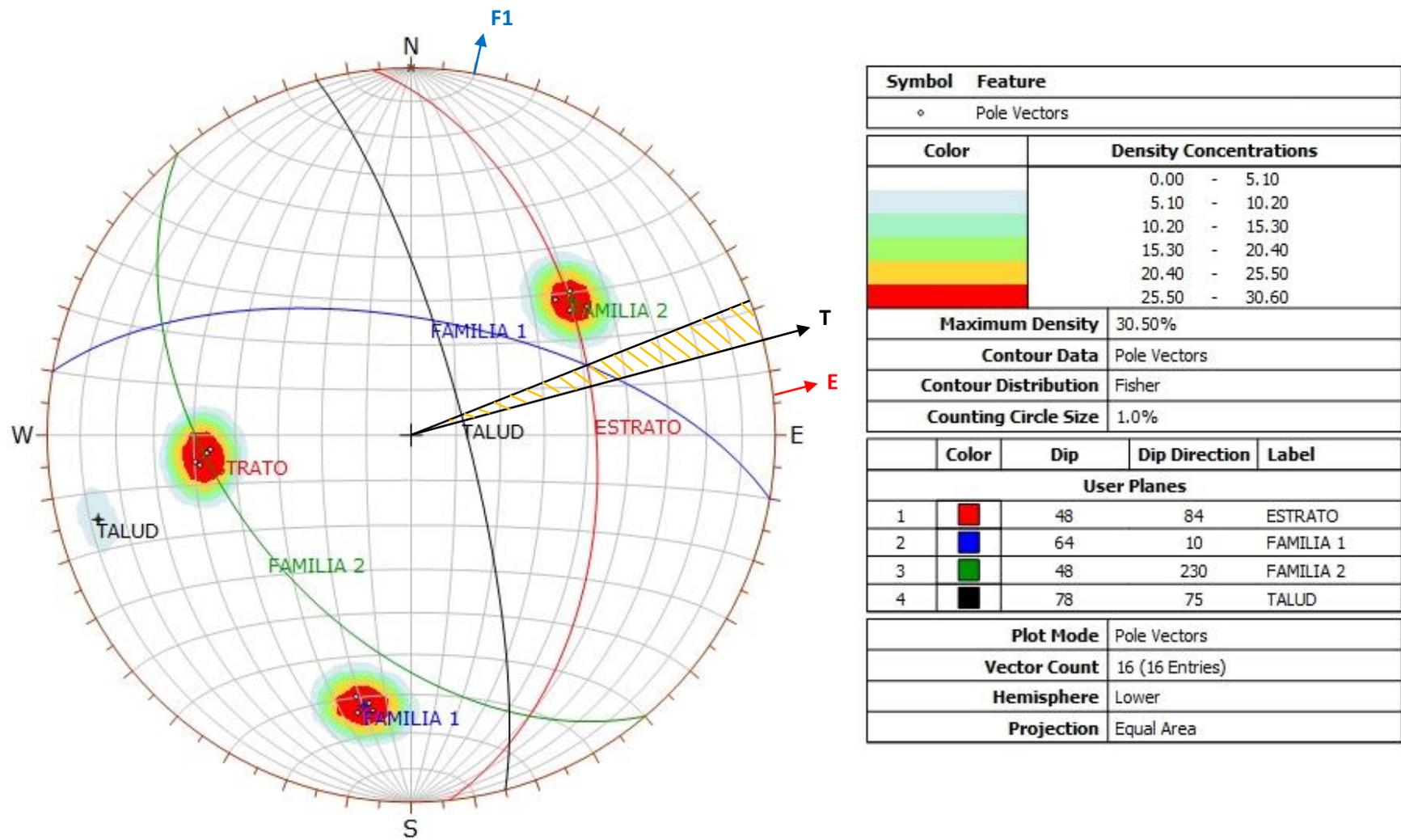
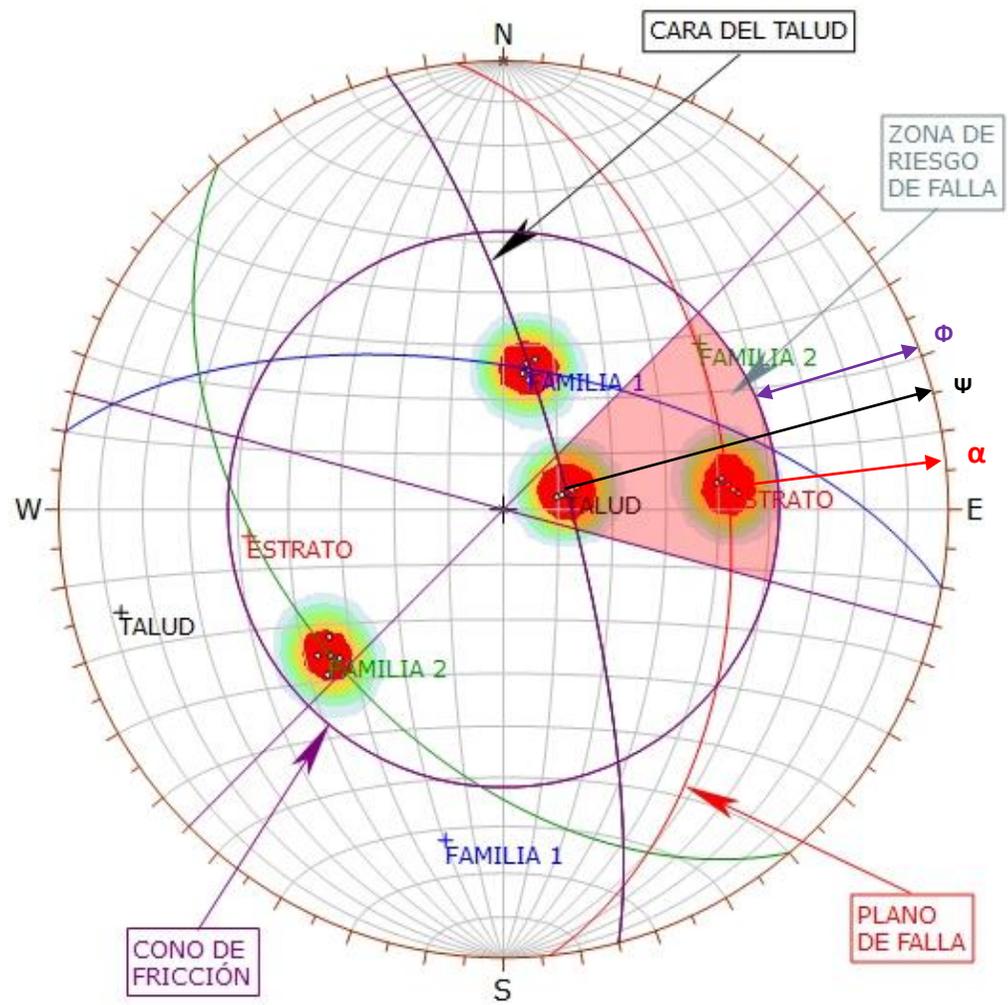


Figura 3.38: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.



Symbol	Feature
°	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.10
	4.10 - 8.20
	8.20 - 12.30
	12.30 - 16.40
	16.40 - 20.50
	20.50 - 24.60

Maximum Density	24.58%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	78
Slope Dip Direction	75
Friction Angle	38°
Lateral Limits	30°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	8	20	40.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.39: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.

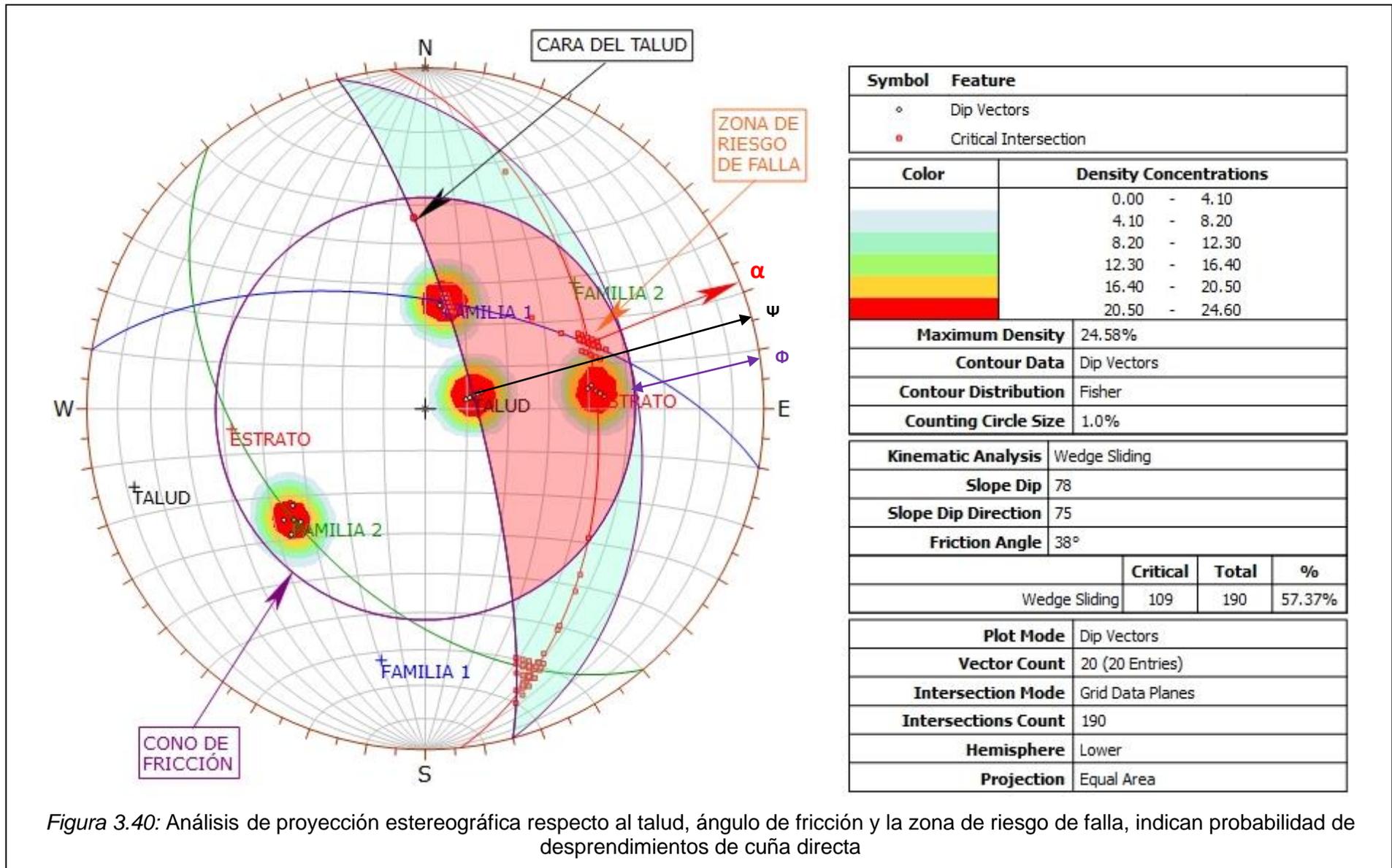


Figura 3.40: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa

Análisis Slide v.6

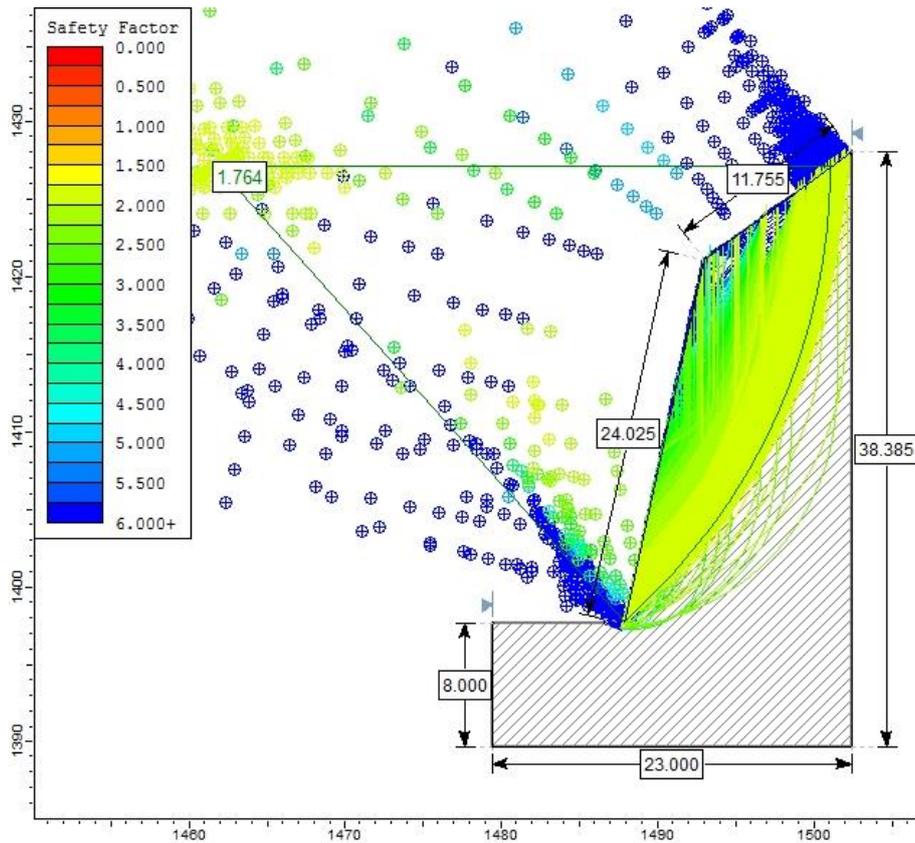


Figura 3.41: Análisis Slide en condiciones normales.

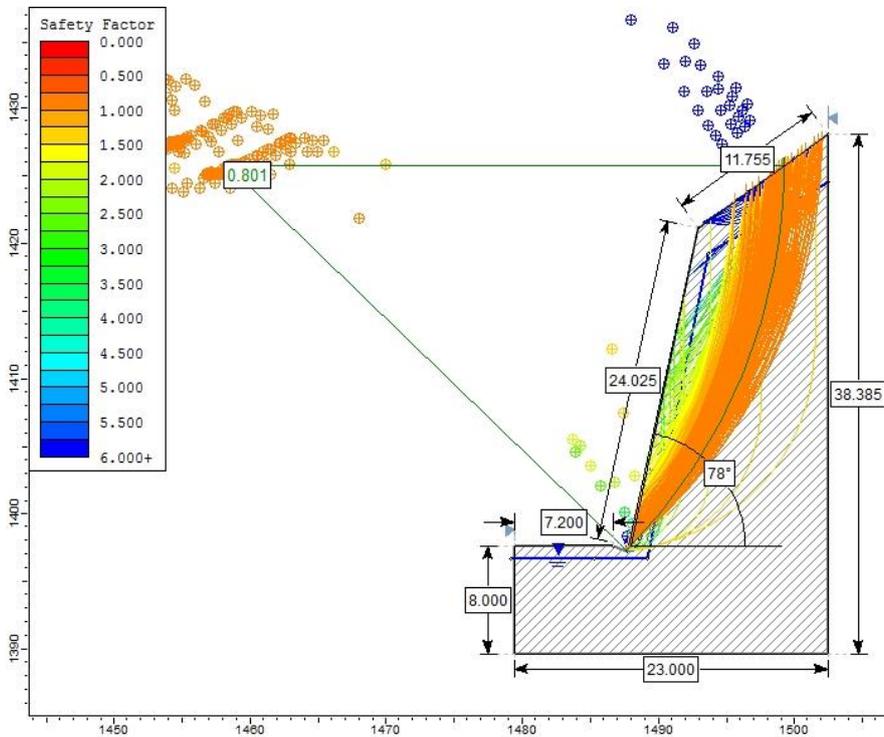


Figura 3.42: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

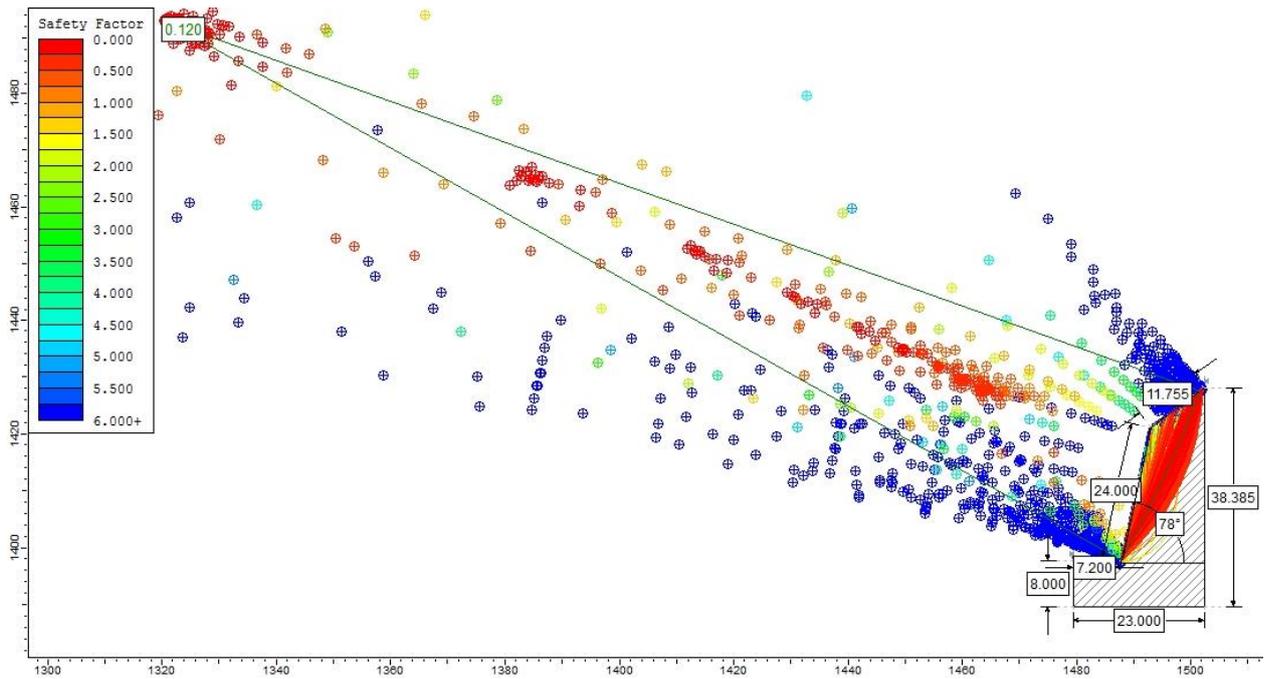


Figura 3.43: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

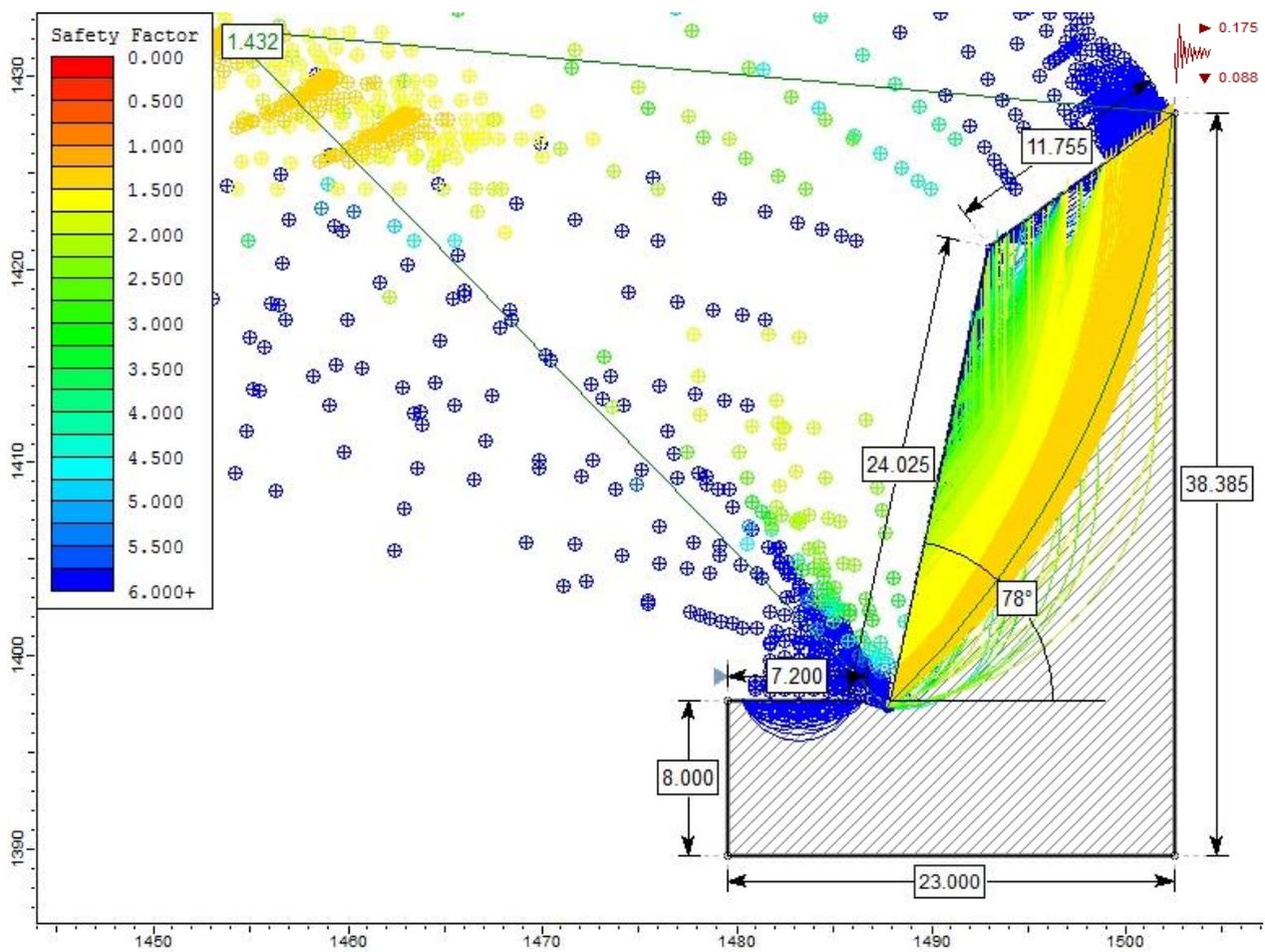


Figura 3.44: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

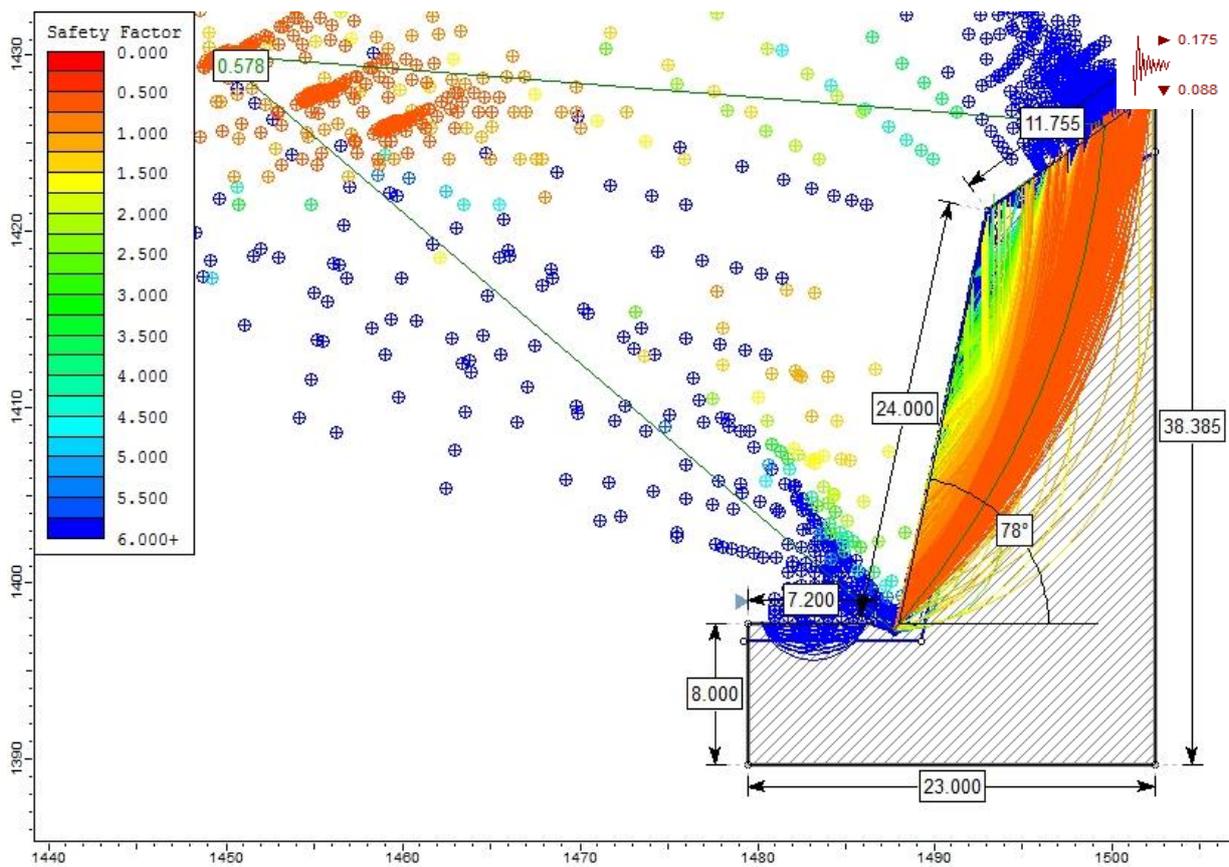


Figura 3.45: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

3.9.5 TRAMO CRÍTICO 05 – PROGRESIVAS Km 139+504 - Km 139+554

Está compuesto por calizas packstone perteneciente al Grupo Pulluicana (K_S -p) con planos de estratificación como se muestra en la Tabla 3.22, conformando tres familias de discontinuidades; moderadamente meteorizados. Encontramos deslizamientos y desprendimientos de rocas, por rotura planar, cuña y vuelcos, generados por la precipitación y sismicidad, los cuales inestabilizan el talud.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	748600	9275108	2107 m.s.n.m



Foto 3.29: Afloramiento de calizas del Grupo Pulluicana en la progresiva Km 139+504 - Km 139+554.

Tabla 3.22: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 05.

LITOLOGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN		
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Calizas / Grupo Pulluicana	1 = Fresco	1 = Alto	1 = Bloq. regular	ESTRATO	69	78
				FAMILIA 1	78	335
	2 = Leve	2 = Medio	2 = Bloq. Irregular	FAMILIA 2	48	180
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3 = Moderado	3 = Bajo	3 = Bloq. y Capas	ALTURA	14 m	
				PIE	26 m	
4 = Alto		4 = Frac. Intenso	D	83		
			DD	344		
	3	2	2			

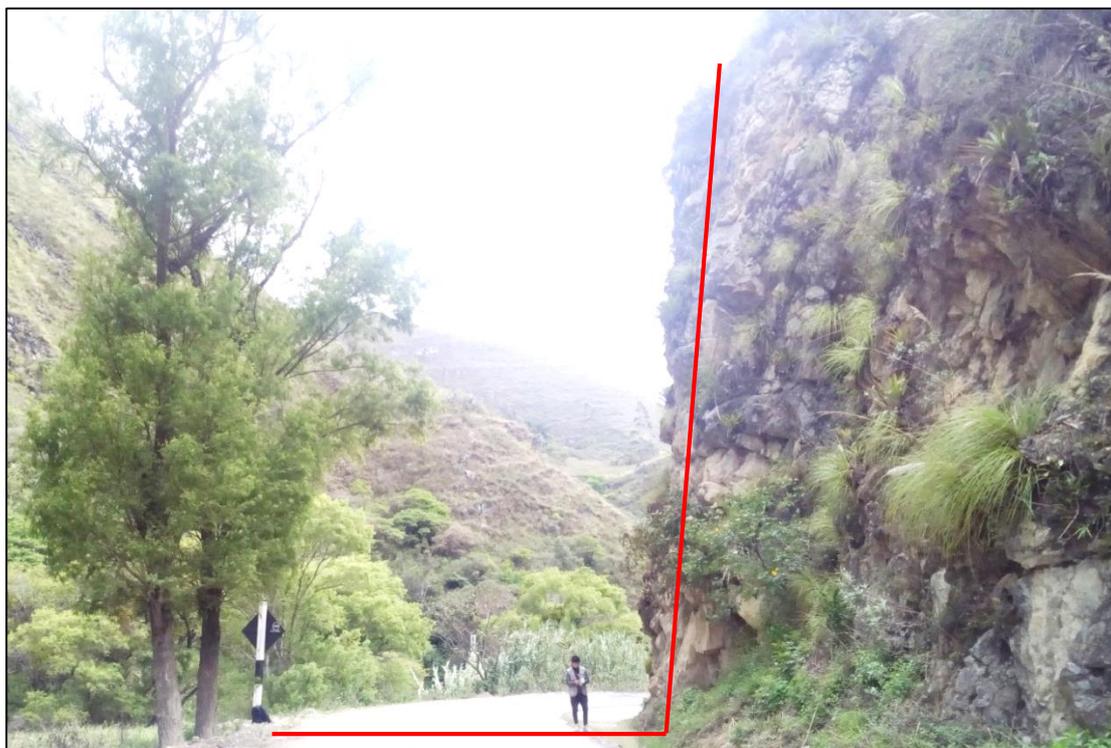


Foto 3.30: Perfil del talud en la progresiva Km 139+504.

Tabla 3.23: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 05.

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	15	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	1
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	7	
VALOR TOTAL RMR						53	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque el macizo rocoso es favorable; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas. Como se muestra en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24: Estimación del GSI para el talud crítico 05.

ESTIMACIÓN DEL GSI						
CÁLCULO DEL RQD						
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$			ND	L(m)	λ	RQD
			61	5	12.2	65..54
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)						
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉	
2	0	5	1	3	11	
GSI=1.5JCOND₈₉ + RQD/2				GSI = 49.27		

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 05 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.46.

Tabla 3.25: Propiedades geomecánicas del talud crítico 05.

PROPIEDADES GEOMECAÑICAS DEL GRUPO PULLUICANA					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	100 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.554	
GSI	49.27		s	0.001	
mi	9		a	0.506	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.3995	Mpa
Ei	65000		ϕ	54.24°	
MR	650	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.116	Mpa
			sigc	2.422	Mpa
			sigcm	9.788	Mpa
			Erm	6655.212	Mpa

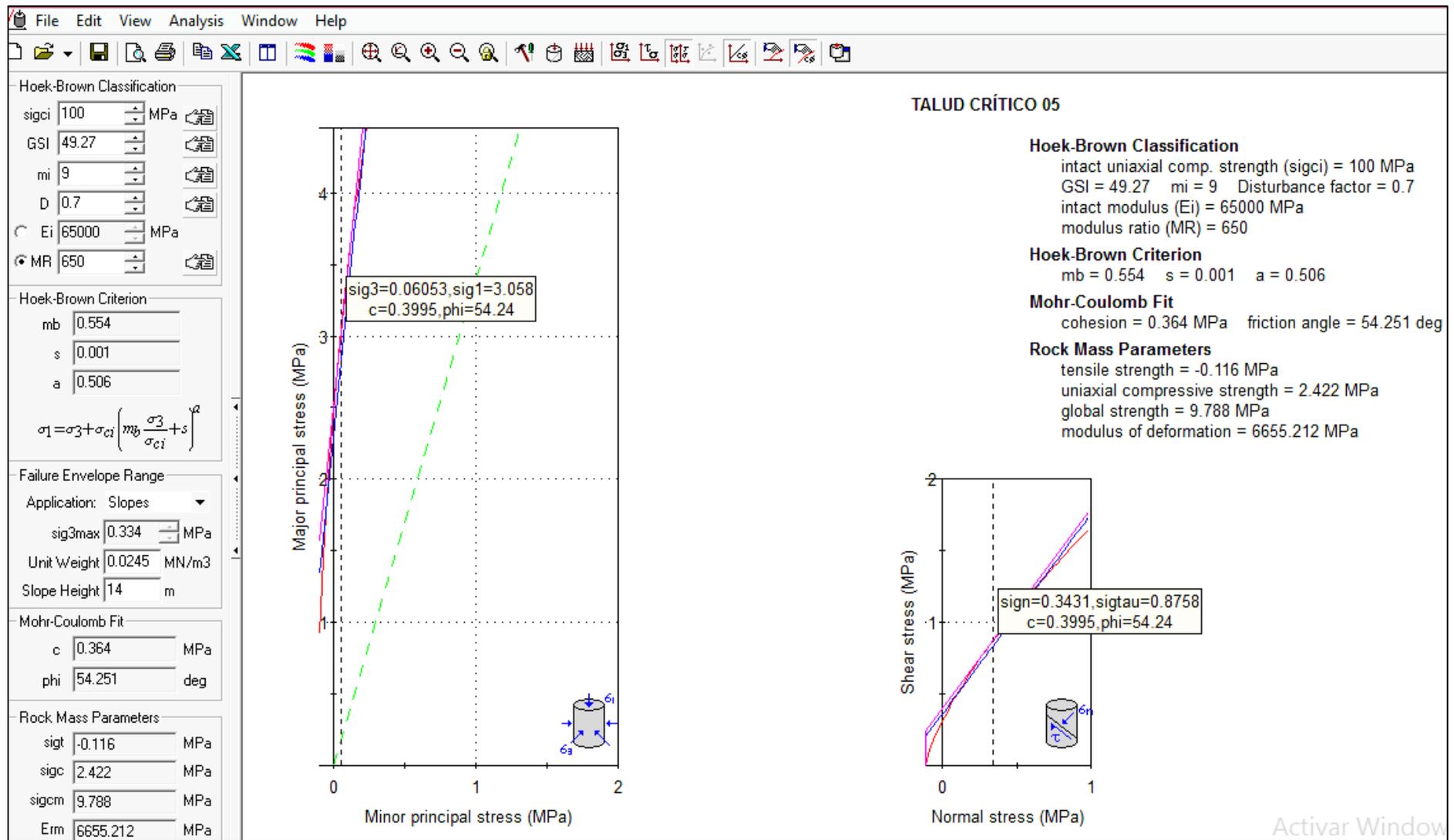
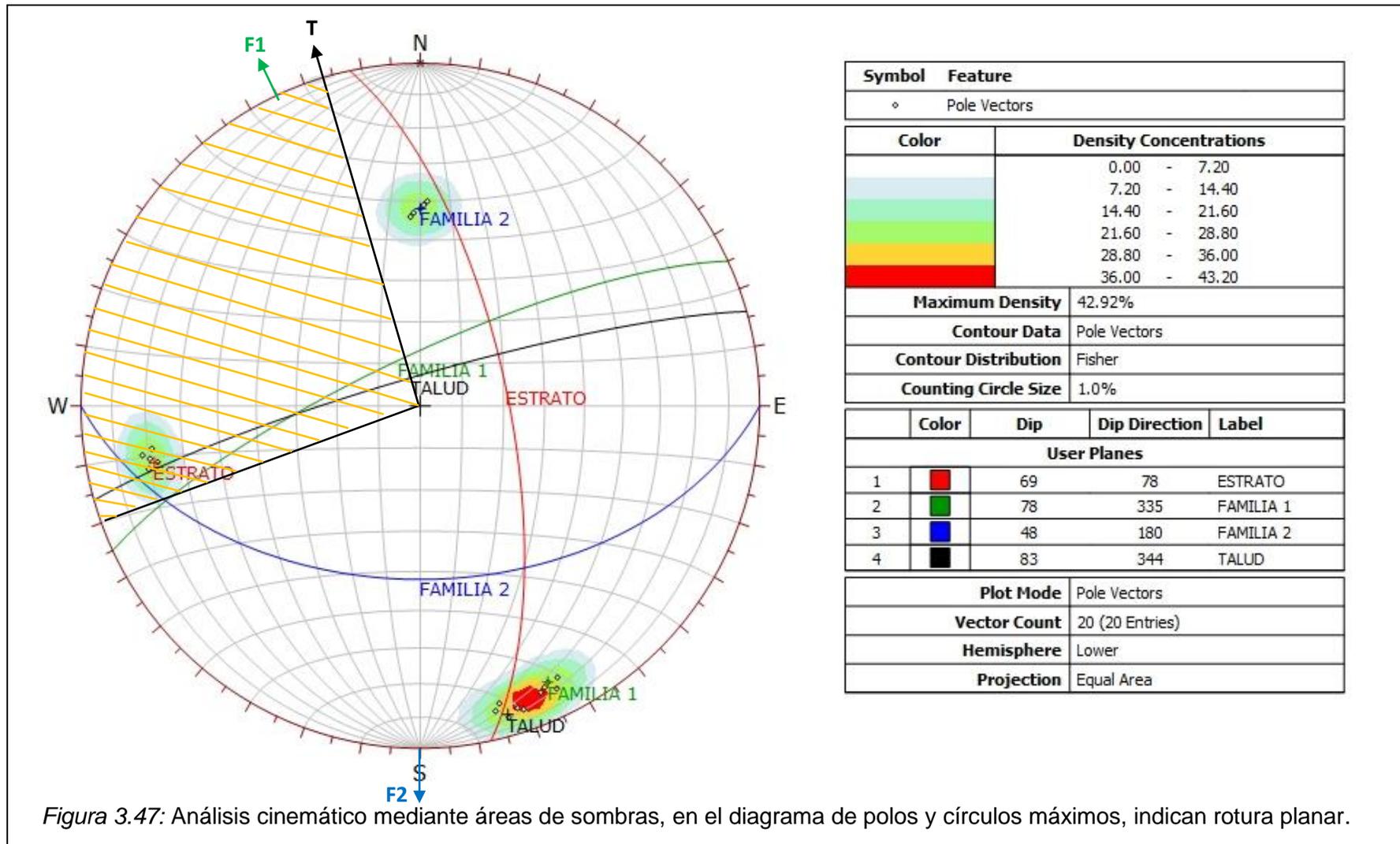
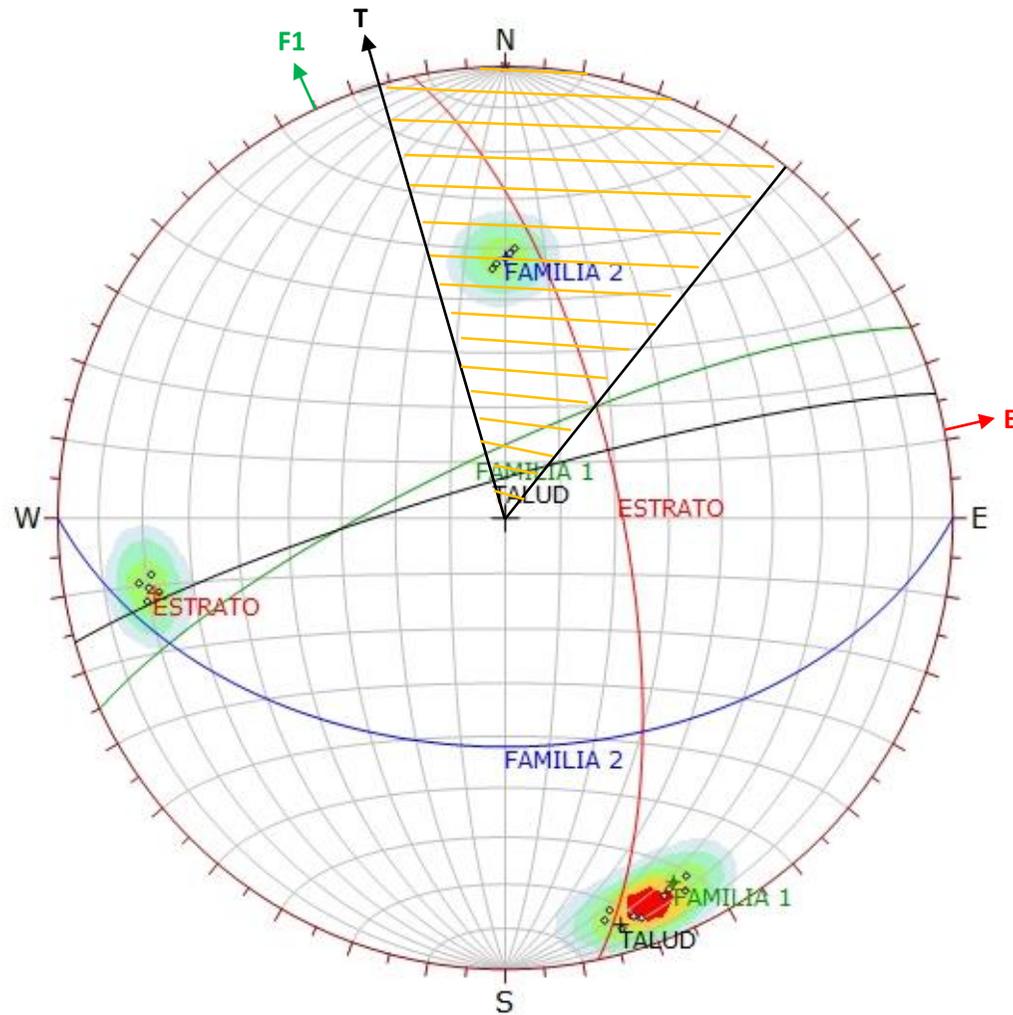


Figura 3.46: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas del Grupo Pullucana.





Symbol	Feature
◦	Pole Vectors

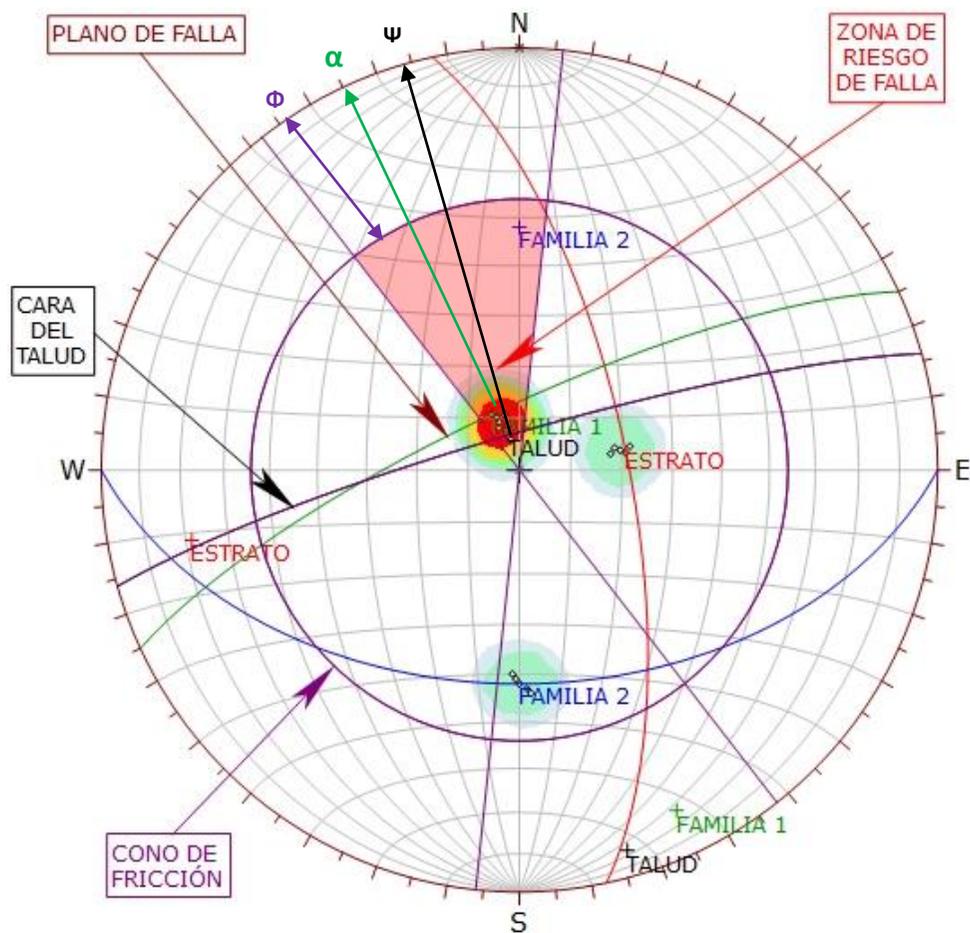
Color	Density Concentrations
	0.00 - 7.20
	7.20 - 14.40
	14.40 - 21.60
	21.60 - 28.80
	28.80 - 36.00
	36.00 - 43.20

Maximum Density	42.92%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		69	78	ESTRATO
2		78	335	FAMILIA 1
3		48	180	FAMILIA 2
4		83	344	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.48: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 8.20
	8.20 - 16.40
	16.40 - 24.60
	24.60 - 32.80
	32.80 - 41.00
	41.00 - 49.20

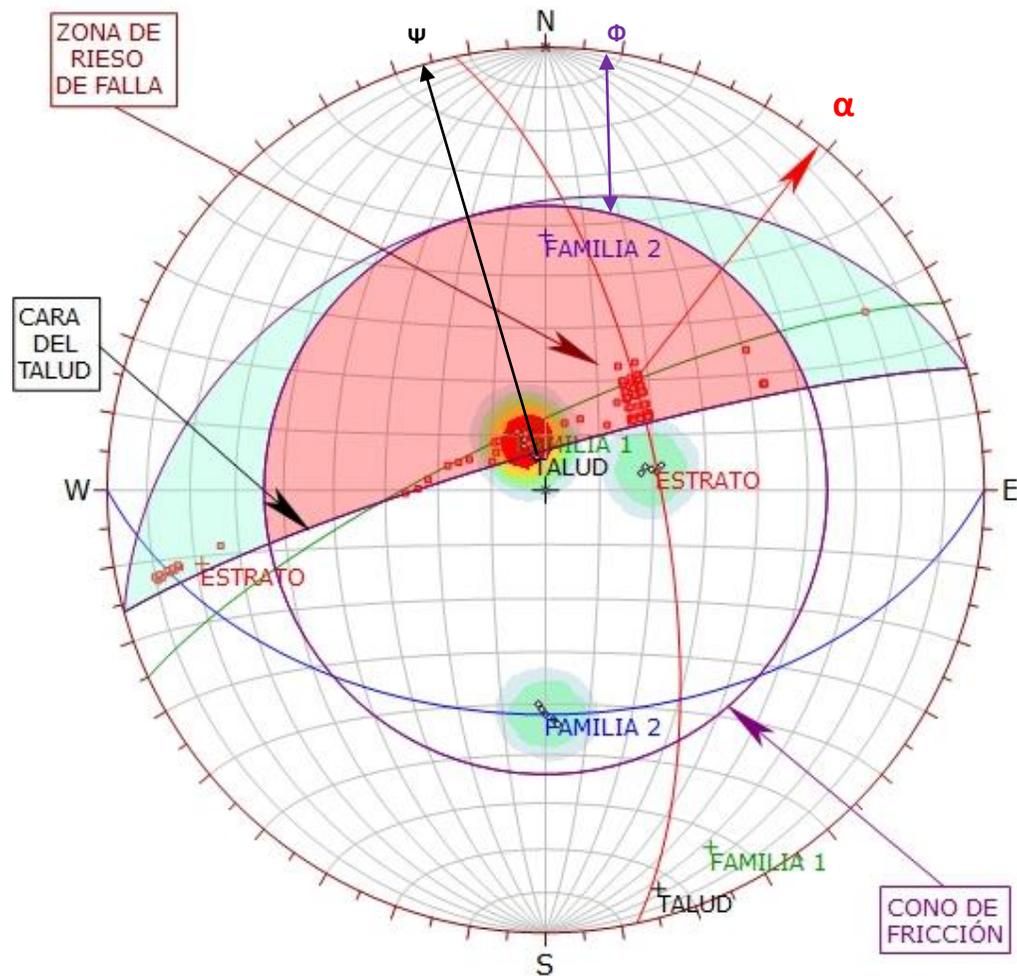
Maximum Density	48.92%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	83
Slope Dip Direction	344
Friction Angle	36°
Lateral Limits	22°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	8	20	40.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.49: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.



Symbol	Feature
◊	Dip Vectors
▪	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
(Light Blue)	0.00 - 8.20
(Light Green)	8.20 - 16.40
(Yellow-Green)	16.40 - 24.60
(Yellow)	24.60 - 32.80
(Orange)	32.80 - 41.00
(Red)	41.00 - 49.20

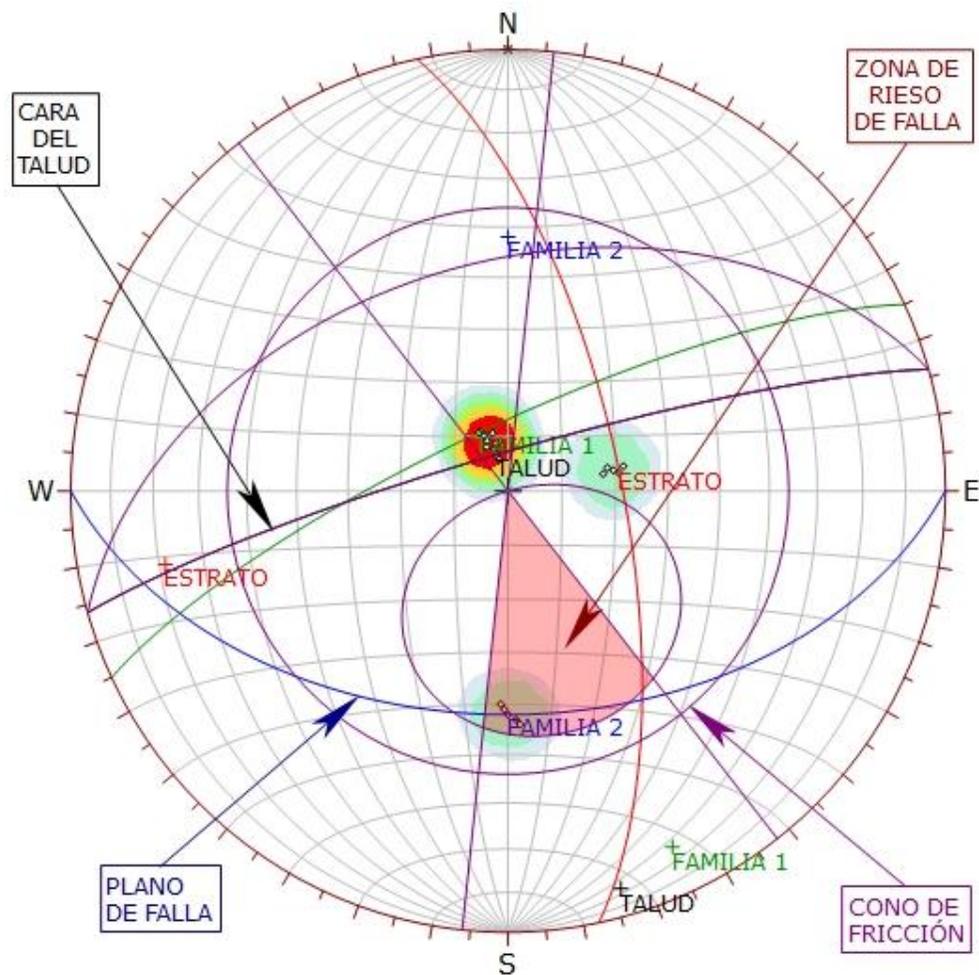
Maximum Density	48.92%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	83
Slope Dip Direction	344
Friction Angle	36°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	81	190	42.63%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	190
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.50: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 8.20
	8.20 - 16.40
	16.40 - 24.60
	24.60 - 32.80
	32.80 - 41.00
	41.00 - 49.20

Maximum Density	48.92%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Flexural Toppling
Slope Dip	83
Slope Dip Direction	344
Friction Angle	36°
Lateral Limits	22°

	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	5	20	25.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.51: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de volcamiento flexural.

Análisis Slide v.6

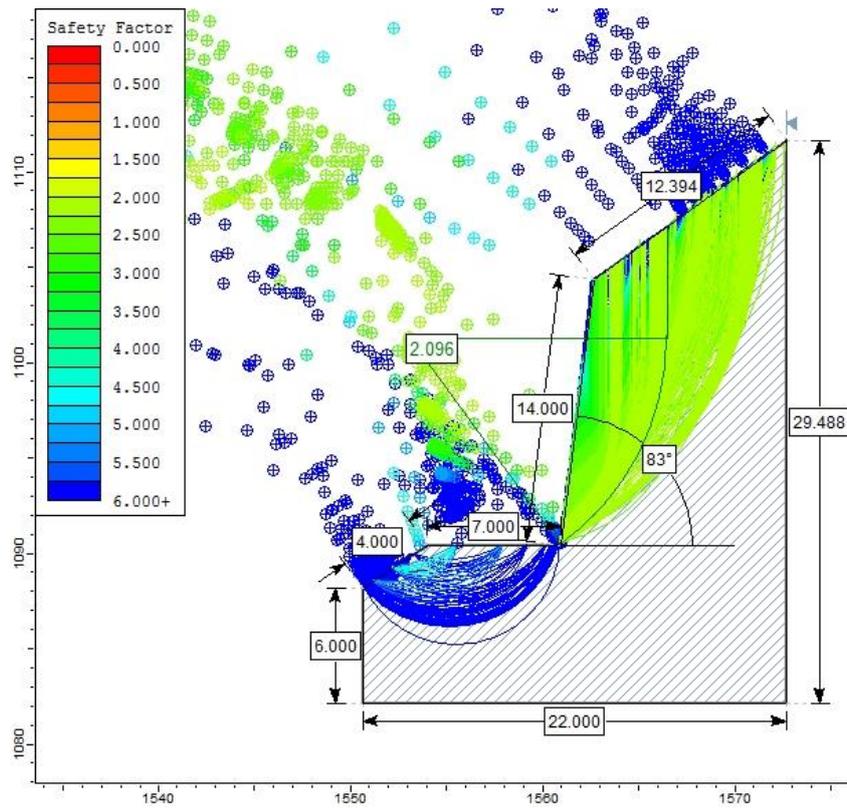


Figura 3.52: Análisis Slide en condiciones naturales.

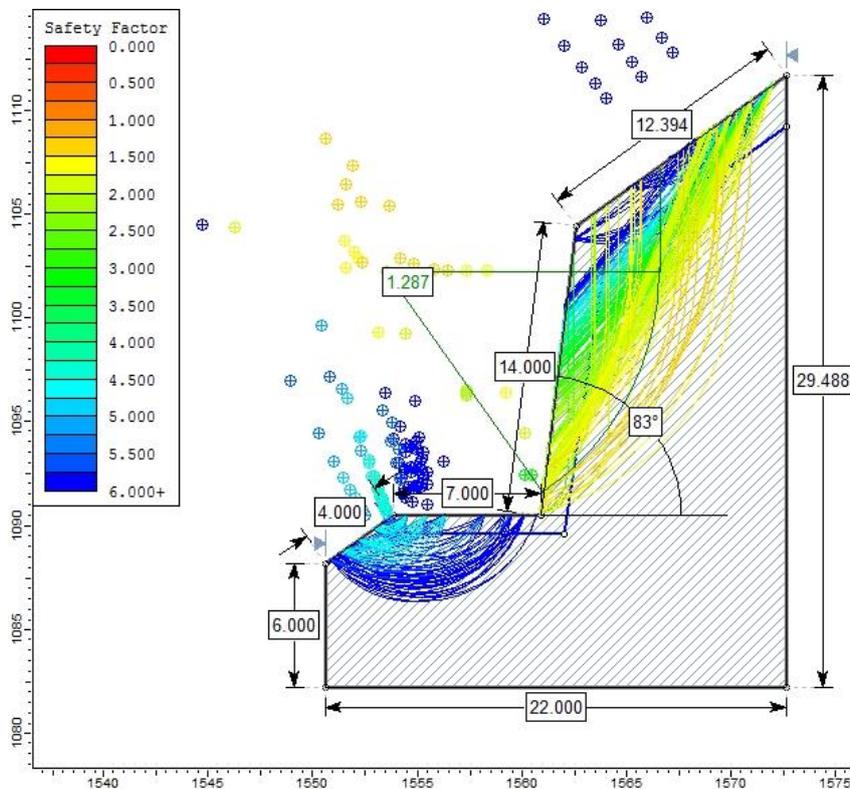


Figura 3.53: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

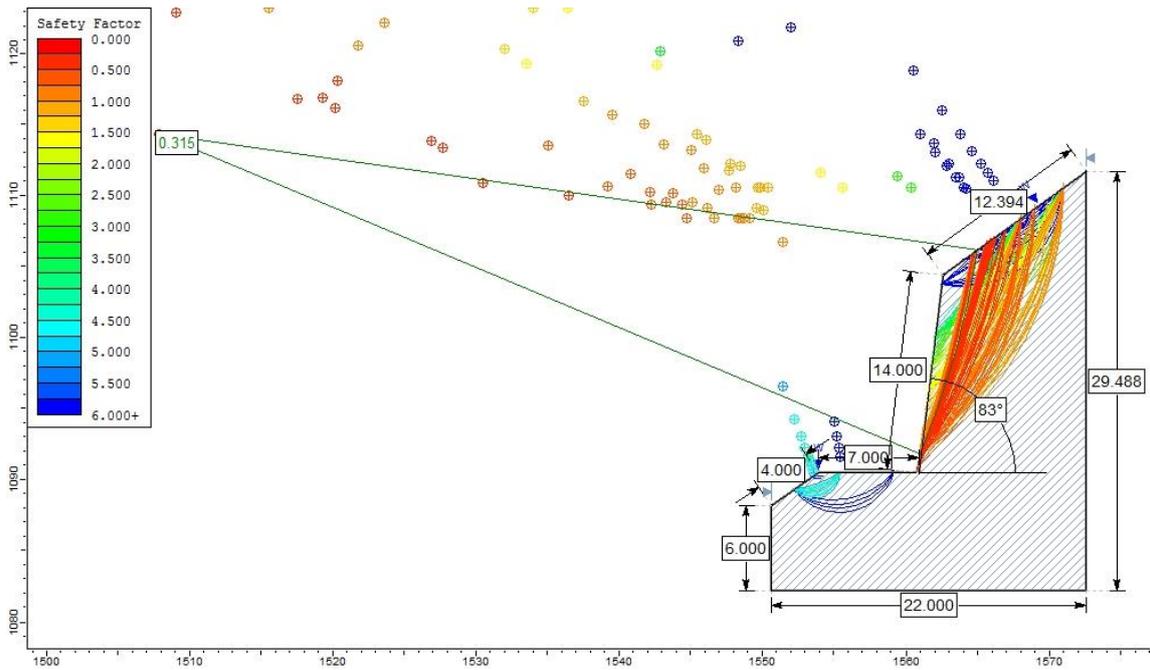


Figura 3.54: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

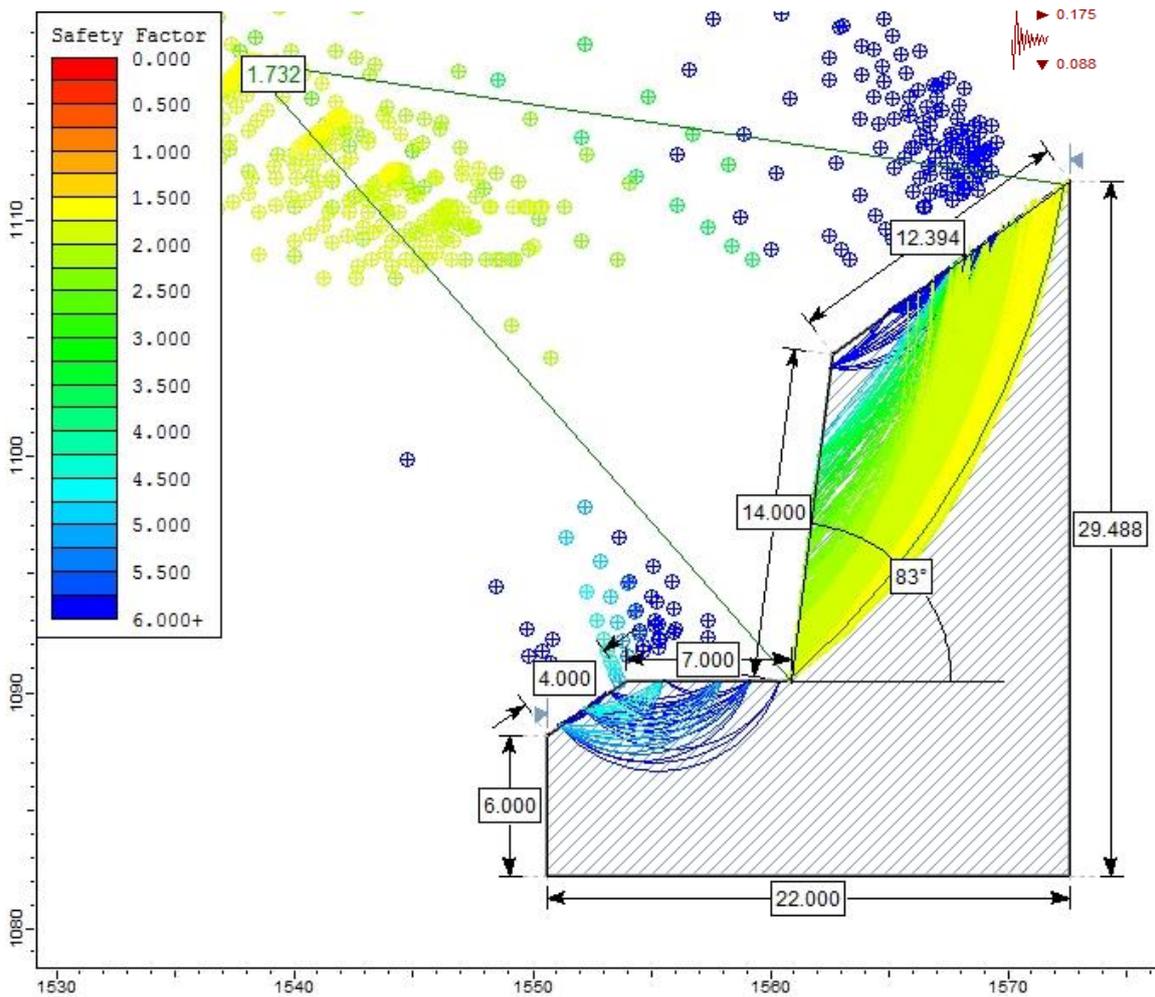


Figura 3.55: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

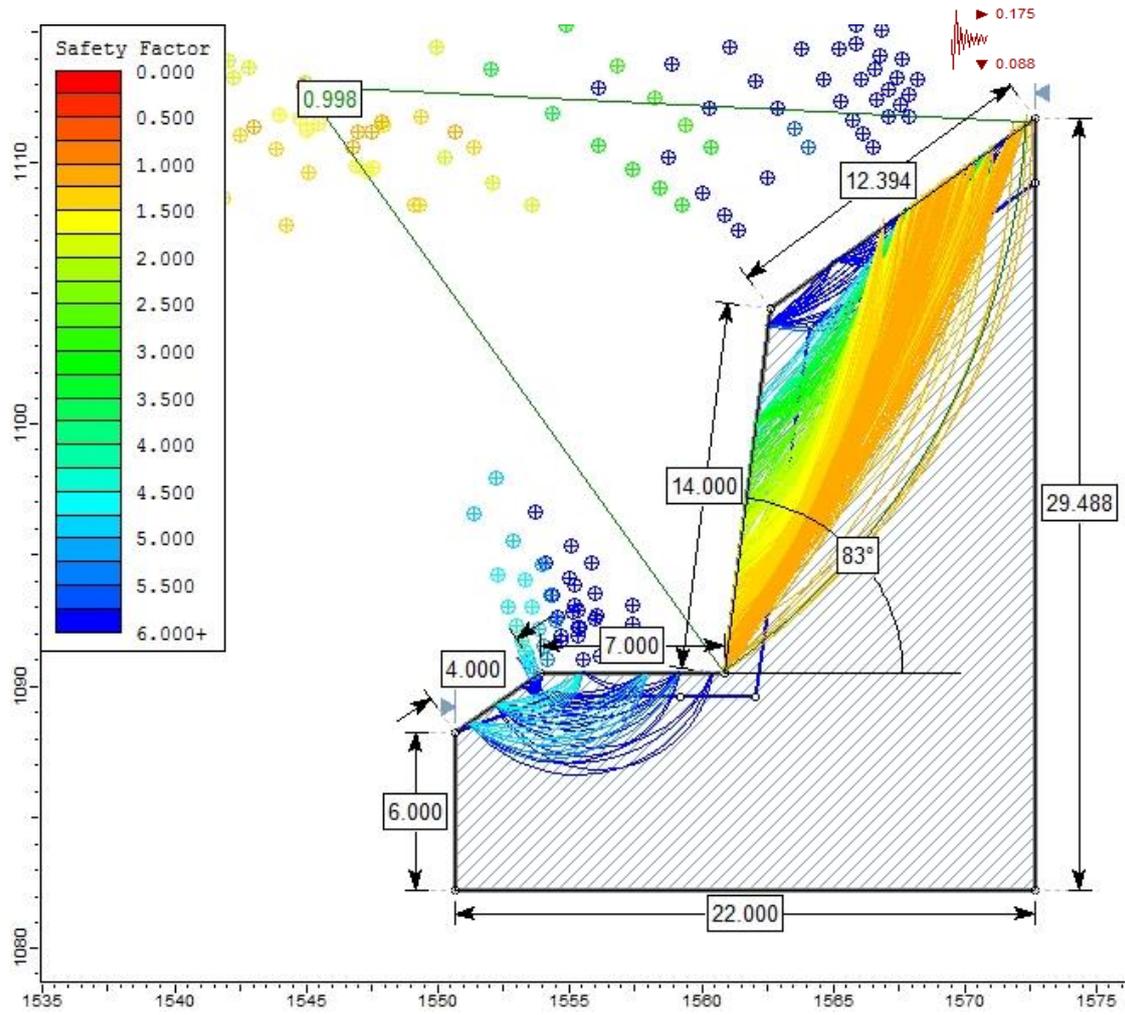


Figura 3.56: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

3.9.6 TRAMO CRÍTICO 06 – PROGRESIVAS Km 138+303 - Km 138+353

Lo constituye calizas bituminosas perteneciente a la Formación Pariatambo (K_i -pa) con planos de estratificación como se muestra en la Tabla 3.26, conformando tres familias de discontinuidades; moderadamente meteorizados; con grado de fracturamiento medio y bloques irregulares. Se evidencian desprendimientos y deslizamientos de rocas, por rotura en cuña y planar, generados por la precipitación y sismicidad, los cuales inestabilizan el talud.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S	ESTE	NORTE	2076 m.s.n.m
		747416	9275294	



Foto 3.31: Afloramiento de calizas bituminosas en la progresiva Km 137+303 - Km 137+353.

Tabla 3.26: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 06.

LITOLÓGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN		
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Calizas / Pariatambo	1 = Fresco	1 = Alto	1 = Bloq. regular	ESTRATO	74	275
				FAMILIA 1	48	138
	2 = Leve	2 = Medio	2 = Bloq. Irregular	FAMILIA 2	72	10
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3 = Moderado	3 = Bajo	3 = Bloq. y Capas	ALTURA	16 m	
				PIE	32 m	
	4 = Alto		4 = Frac. Intenso	D	78	
DD				6		
3	2	2				



Foto 3.32: Perfil del talud en el Km 137+303.

Tabla 3.27: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 06.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	10	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	1
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	7	
VALOR TOTAL RMR						48	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque el macizo rocoso es favorable; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas. Como se muestra en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28: Estimación del GSI para el talud crítico 06.

ESTIMACIÓN DEL GSI					
CÁLCULO DEL RQD					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$	ND	L(m)	λ	RQD	
	72	5	14.4	57.81	
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉
2	0	5	0	3	10
$GSI=1.5JCOND_{89} + RQD/2$				GSI = 43.90	

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 06 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.57.

Tabla 3.29: Propiedades geomecánicas del talud crítico 06.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN PARIATAMBO					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	85	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.413	
GSI	43.9		s	0.00294	
mi	9		a	0.509	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.2613	Mpa
Ei	55250		ϕ	51.67°	
MR	650	PÁRÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.061	Mpa
			sigc	1.359	Mpa
			sigcm	7.020	Mpa
			Erm	4042.524	Mpa

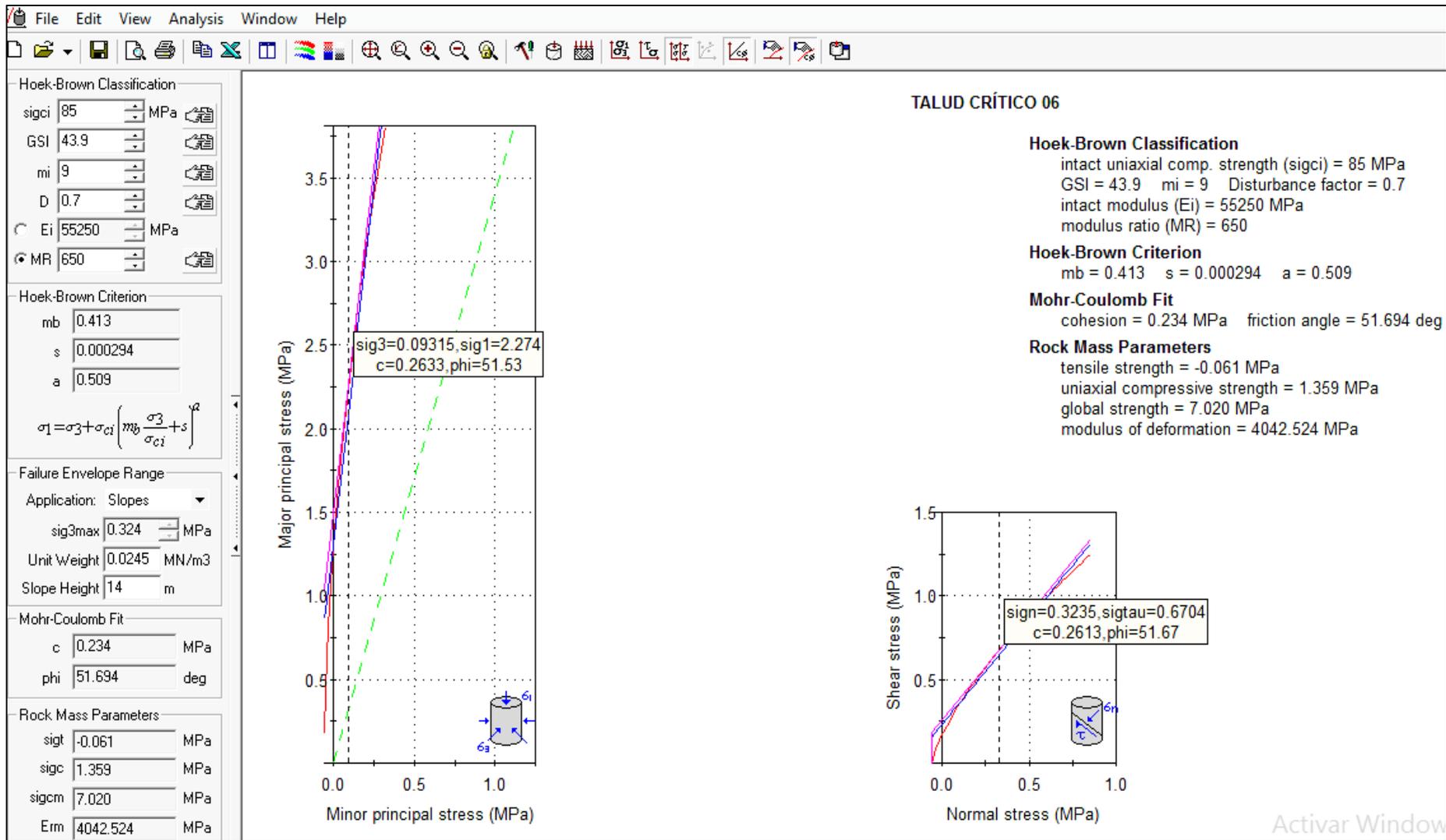


Figura 3.57: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Pariatambo.

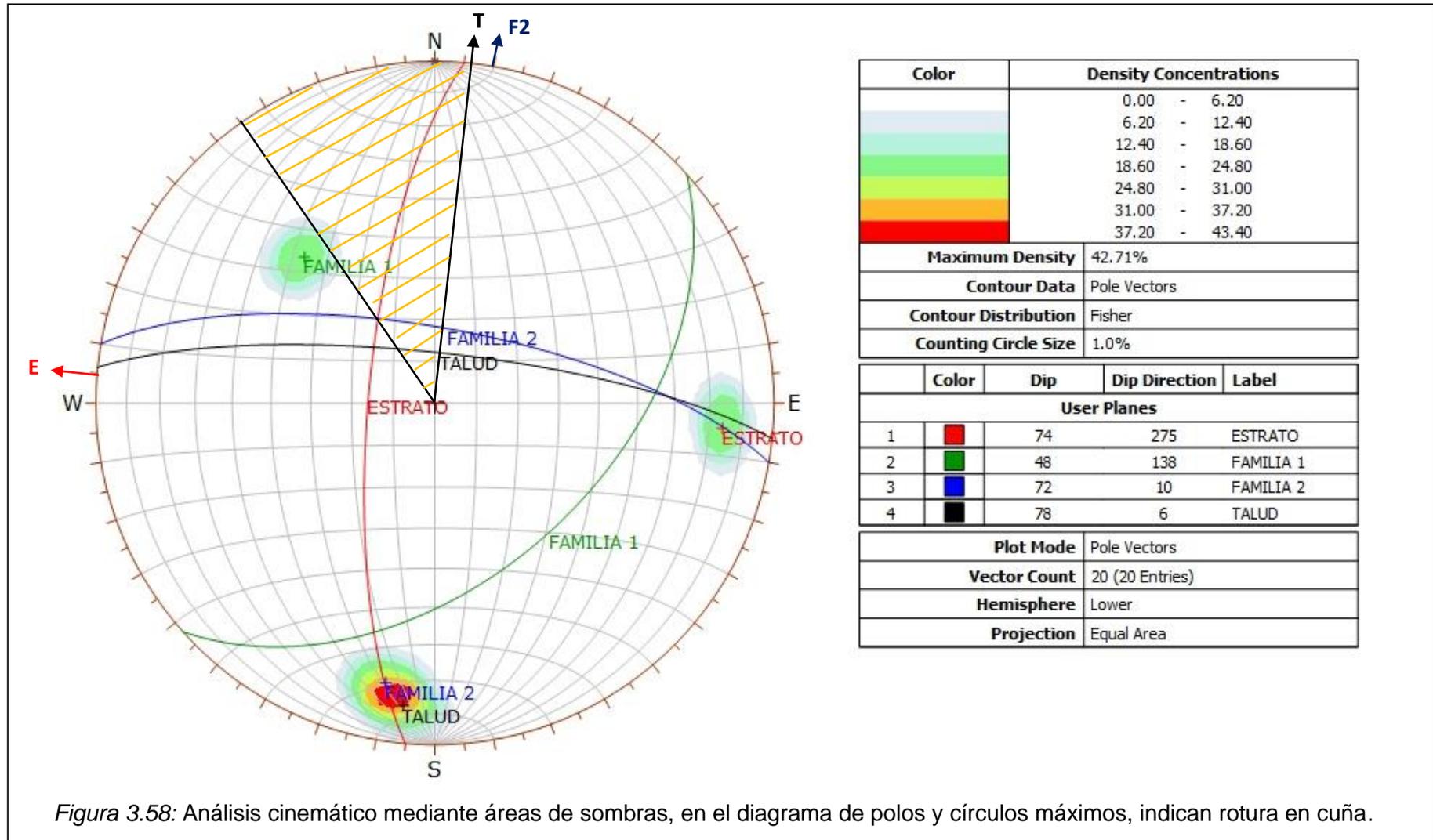
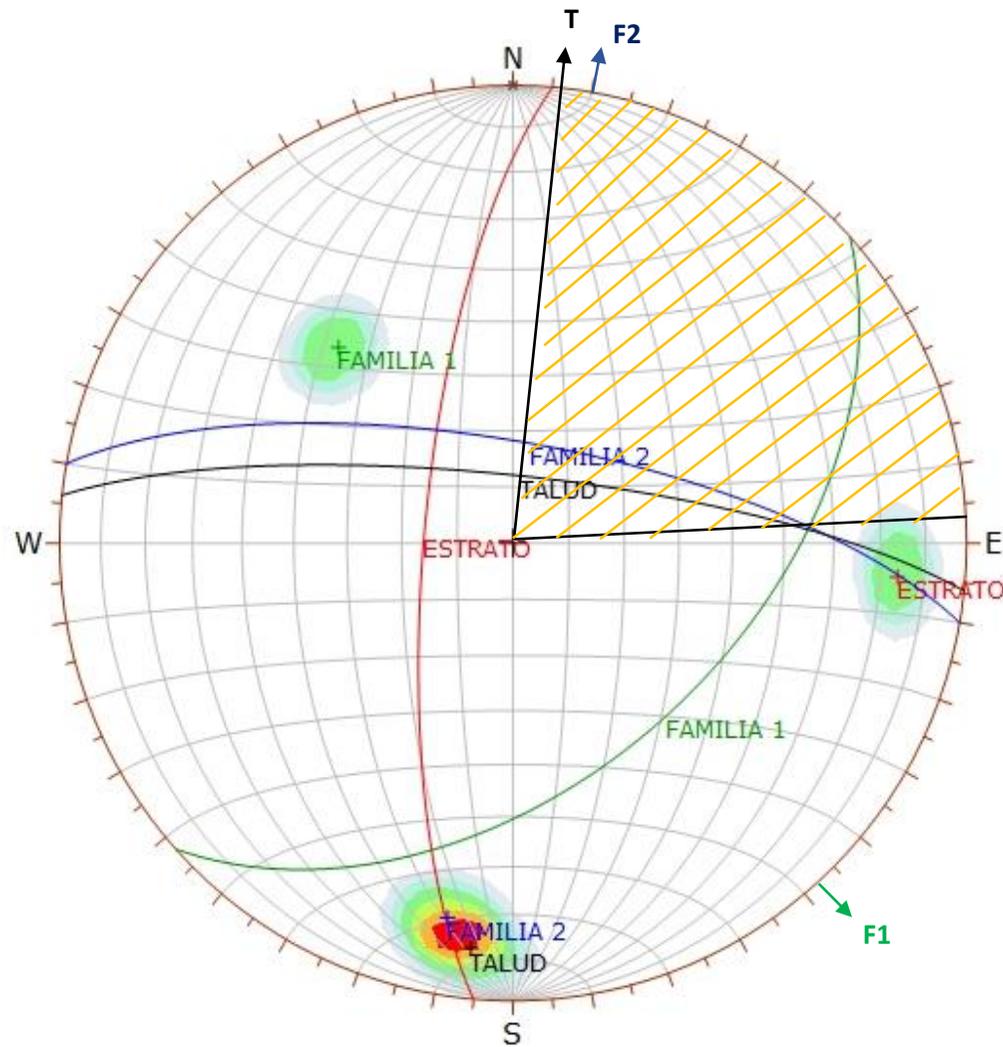
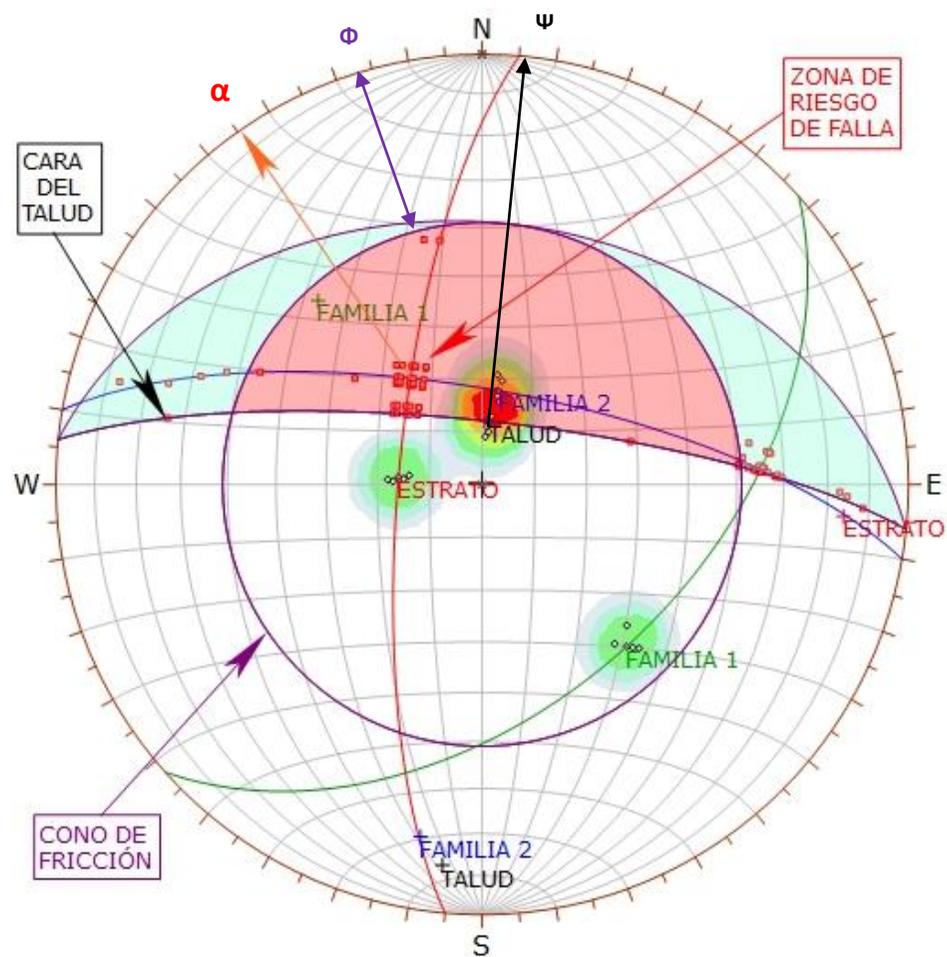


Figura 3.58: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.



Color	Density Concentrations		
	0.00 - 6.20		
	6.20 - 12.40		
	12.40 - 18.60		
	18.60 - 24.80		
	24.80 - 31.00		
	31.00 - 37.20		
	37.20 - 43.40		
Maximum Density 42.71%			
Contour Data Pole Vectors			
Contour Distribution Fisher			
Counting Circle Size 1.0%			
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	74	275	ESTRATO
2	48	138	FAMILIA 1
3	72	10	FAMILIA 2
4	78	6	TALUD
Plot Mode Pole Vectors			
Vector Count 20 (20 Entries)			
Hemisphere Lower			
Projection Equal Area			

Figura 3.59: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors
▪	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 6.40
	6.40 - 12.80
	12.80 - 19.20
	19.20 - 25.60
	25.60 - 32.00
	32.00 - 38.40
	38.40 - 44.80

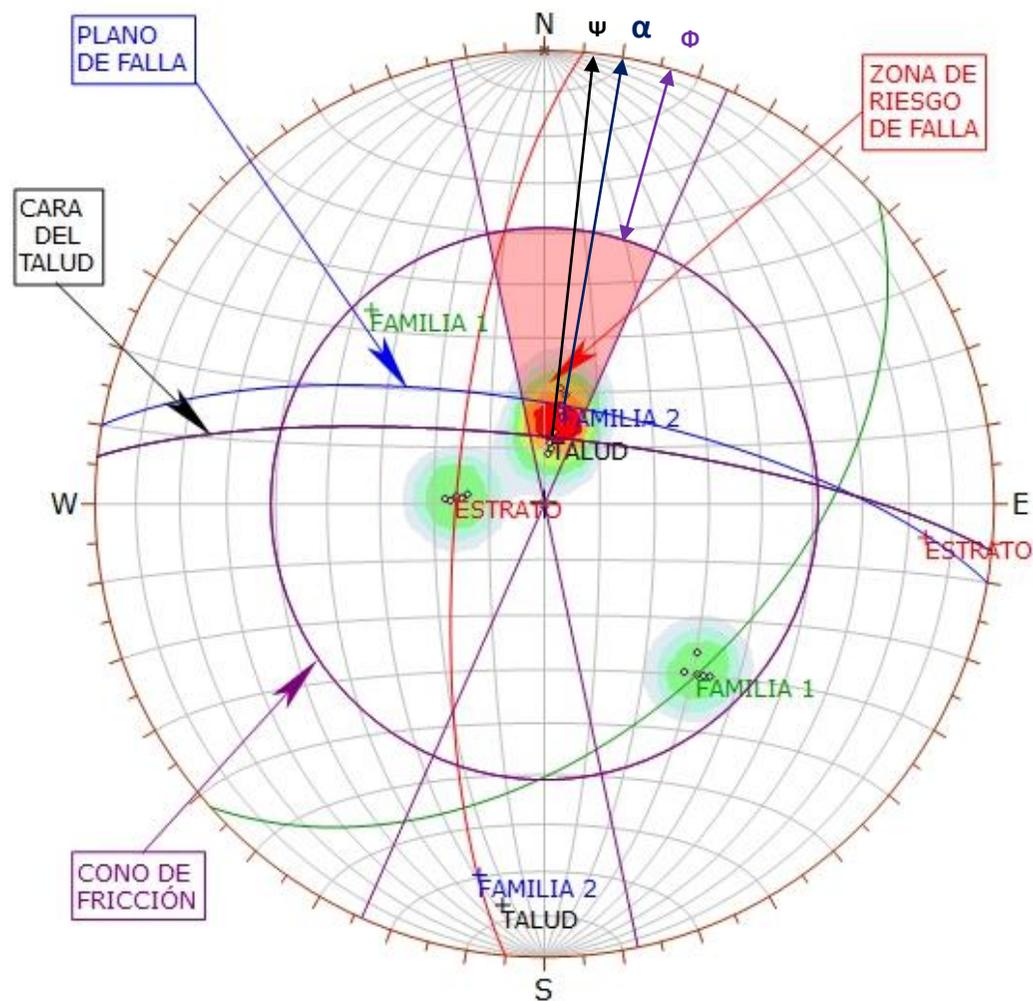
Maximum Density	44.41%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	78
Slope Dip Direction	6
Friction Angle	39°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	77	190	40.53%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	190
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.60: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimiento de cuña directa.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 6.40
	6.40 - 12.80
	12.80 - 19.20
	19.20 - 25.60
	25.60 - 32.00
	32.00 - 38.40
	38.40 - 44.80

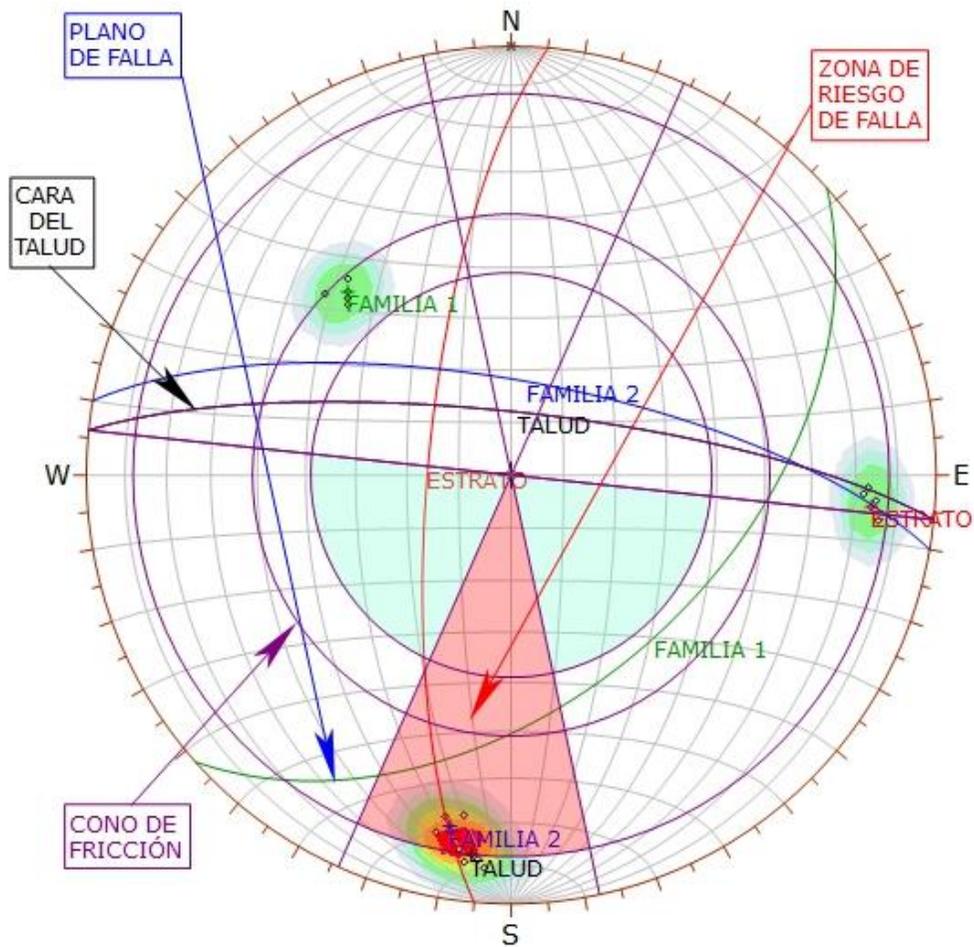
Maximum Density	44.41%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	78
Slope Dip Direction	6
Friction Angle	39°
Lateral Limits	18°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	7	20	35.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.61: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.



Symbol	Feature
◦	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 6.20
	6.20 - 12.40
	12.40 - 18.60
	18.60 - 24.80
	24.80 - 31.00
	31.00 - 37.20
	37.20 - 43.40

Maximum Density	42.71%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Direct Toppling
Slope Dip	78
Slope Dip Direction	6
Friction Angle	39°
Lateral Limits	18°

	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	31	190	16.32%
Oblique Toppling (Intersection)	3	190	1.58%
Base Plane (All)	7	20	35.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.62: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de volcamiento directo.

Análisis Slide v.6

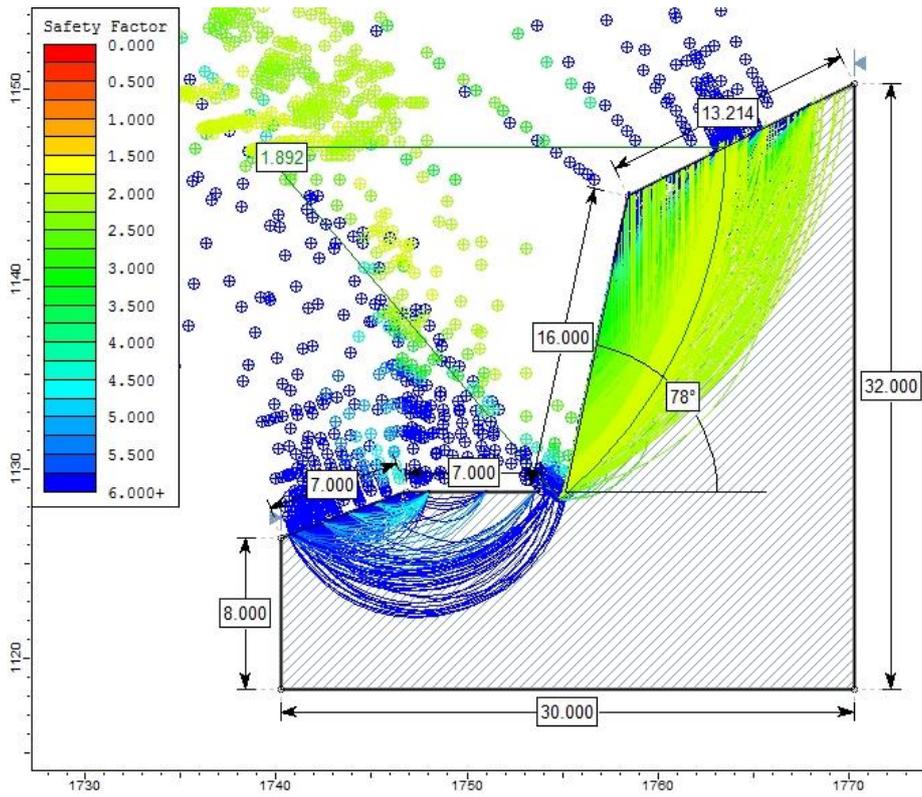


Figura 3.63: Análisis Slide en condiciones naturales.

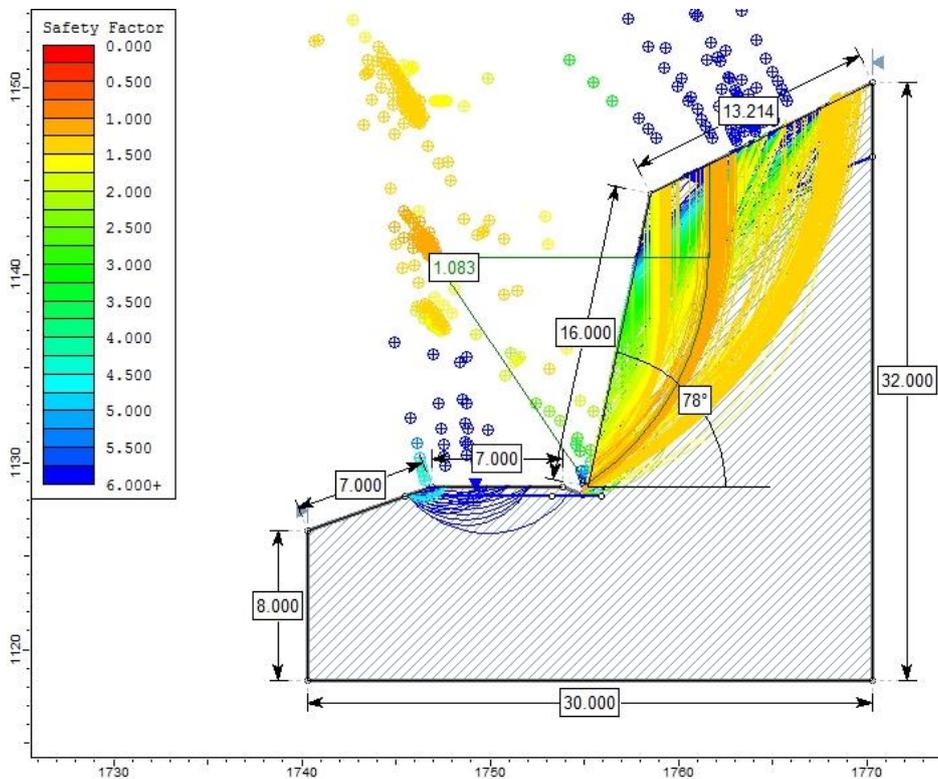


Figura 3.64: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

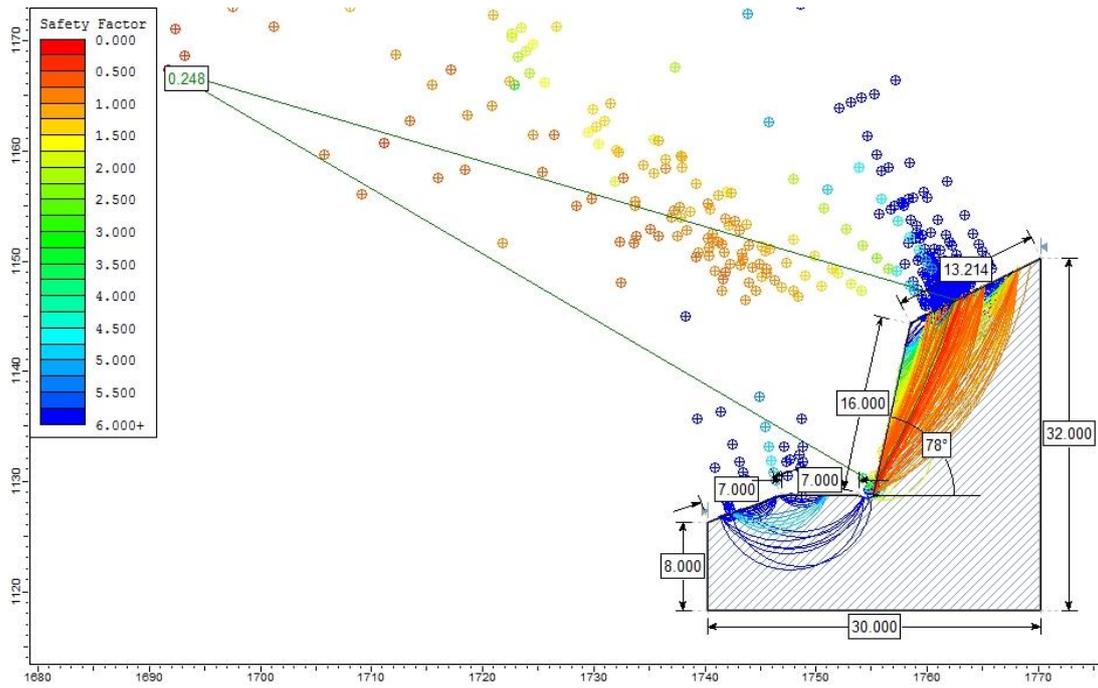


Figura 3.65: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

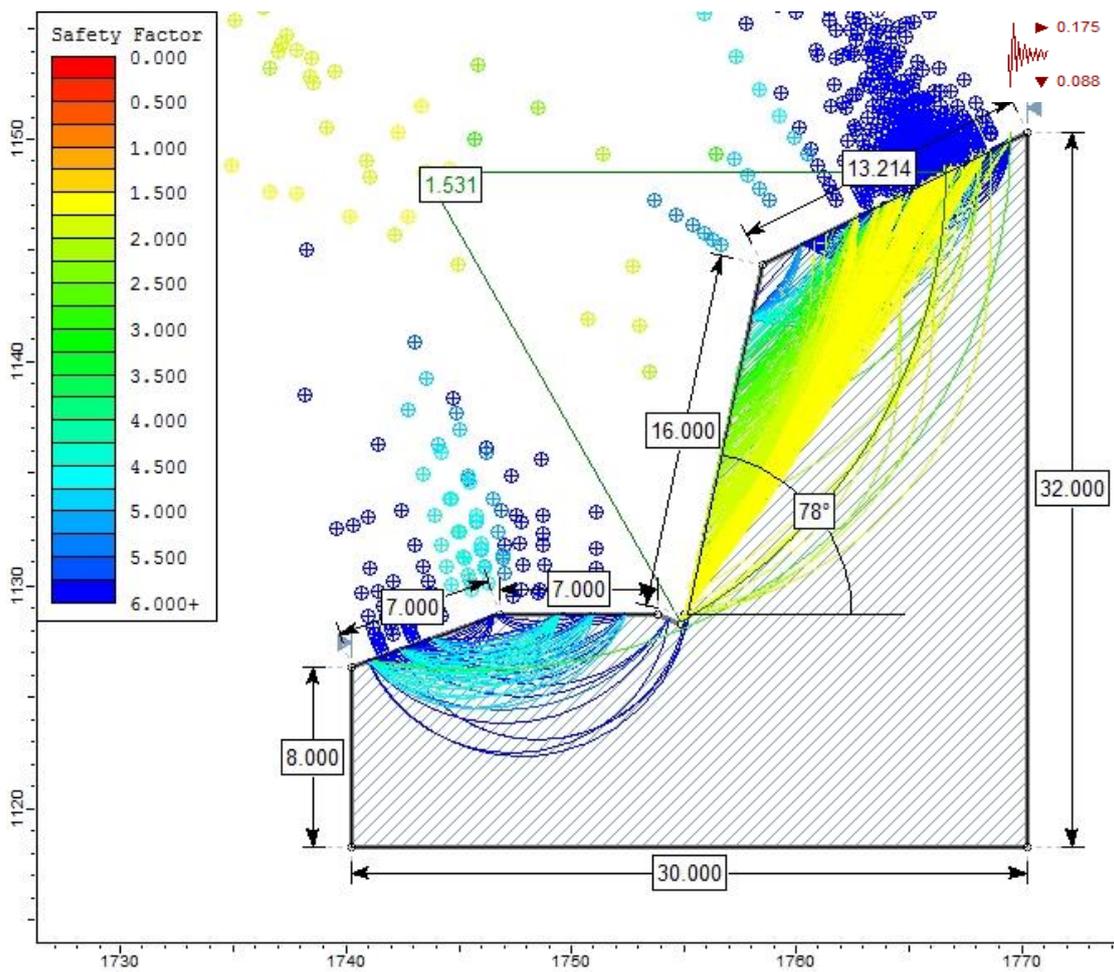


Figura 3.66: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

3.9.7 TRAMO CRÍTICO 07 – PROGRESIVAS Km 136+163 - Km 136+213

Está compuesto por calizas arenosas, margas, perteneciente a la Formación Chulec (K_1 -ch), moderadamente meteorizadas, evidenciándose su tonalidad amarillenta; conformando tres familias de discontinuidades, con alto grado de fracturamiento y bloques irregulares. Encontramos desprendimientos constantes de rocas, por rotura en cuña con respecto a su discontinuidad crítica; generados por la precipitación y sismicidad, socavando de manera progresiva e inestabilizando el talud.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S	ESTE	NORTE	2089 m.s.n.m
		745664	9276166	



Foto 3.33: Afloramiento de calizas arenosas en la progresiva Km 135+163 - Km 135+213.

Tabla 3.30: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 07.

LITOLÓGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN		
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Calizas arenosas / Chulec	1 = Fresco	1 = Alto	1 = Bloq. regular	ESTRATO	52	128
				FAMILIA 1	62	34
	2 = Leve	2 = Medio	2 = Bloq. Irregular	FAMILIA 2	70	274
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3 = Moderado	3 = Bajo	3 = Bloq. y Capas	ALTURA	18 m	
				PIE	35 m	
	4 = Alto		4 = Frac-intenso	D	77	
				DD	65	
3	1	3				



Foto 3.34: Perfil del talud en la progresiva Km 135+163.

Tabla 3.31: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 07.

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	8	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	3
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	0
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	1
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	7	
VALOR TOTAL RMR						43	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque el macizo rocoso es favorable; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas. Como se muestra en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32: Estimación del GSI para el talud crítico 07.

ESTIMACIÓN DEL GSI						
CÁLCULO DEL RQD						
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$			ND	L(m)	λ	RQD
			78	5	15.6	53.79
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)						
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉	
4	0	3	0	1	8	
GSI=1.5JCOND₈₉ + RQD/2				GSI = 38.89		

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 07 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.68.

Tabla 3.33: Propiedades geomecánicas del talud crítico 07.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CHULEC					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	70 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.279	
GSI	38.89		s	0.000142	
mi	8		a	0.512	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.2008	Mpa
Ei	42000 Mpa		ϕ	45.74°	
MR	600	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.036	Mpa
			sigc	0.750	Mpa
			sigcm	4.625	Mpa
			Erm	2299.794	Mpa

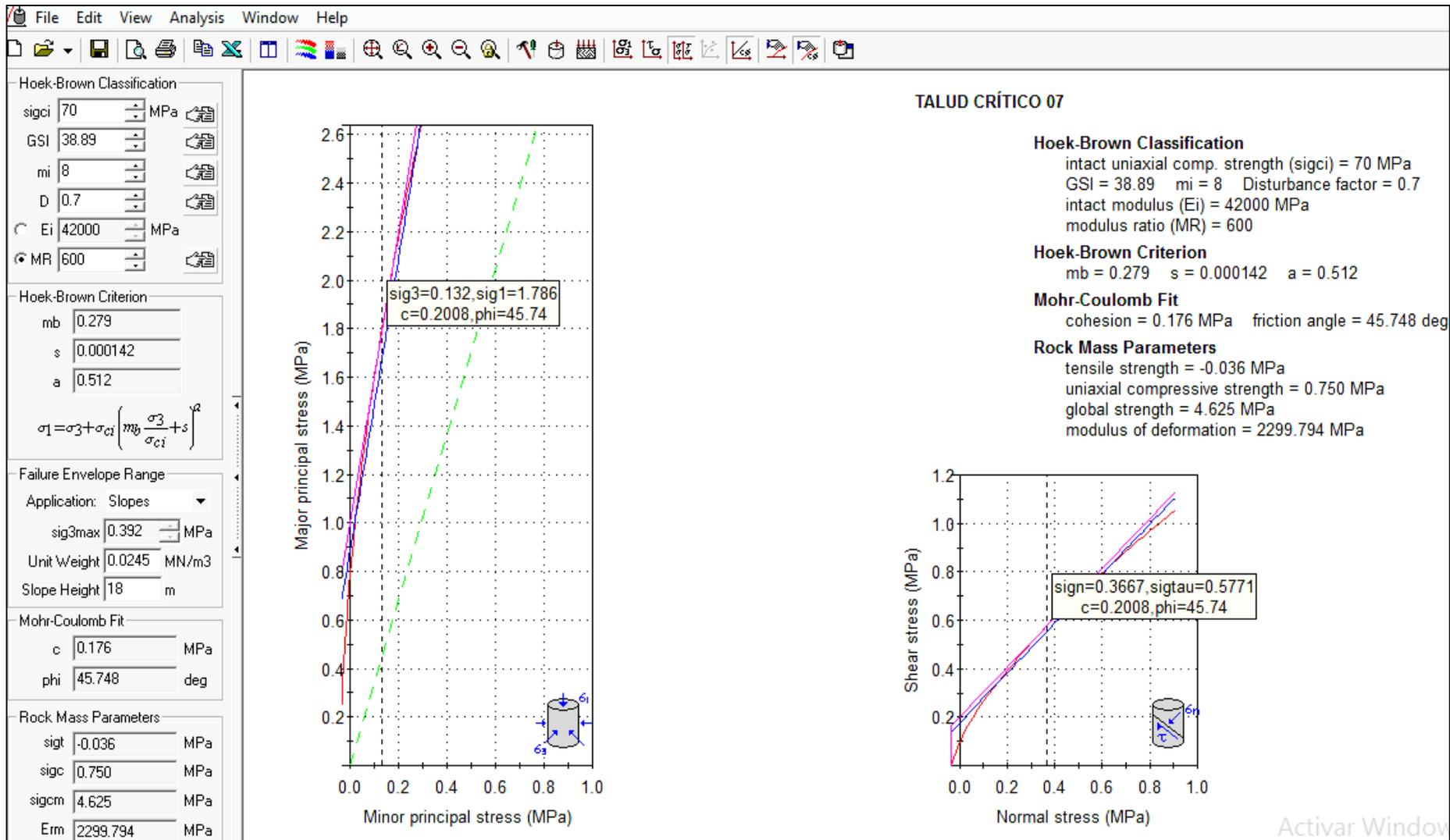


Figura 3.68: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Chulec.

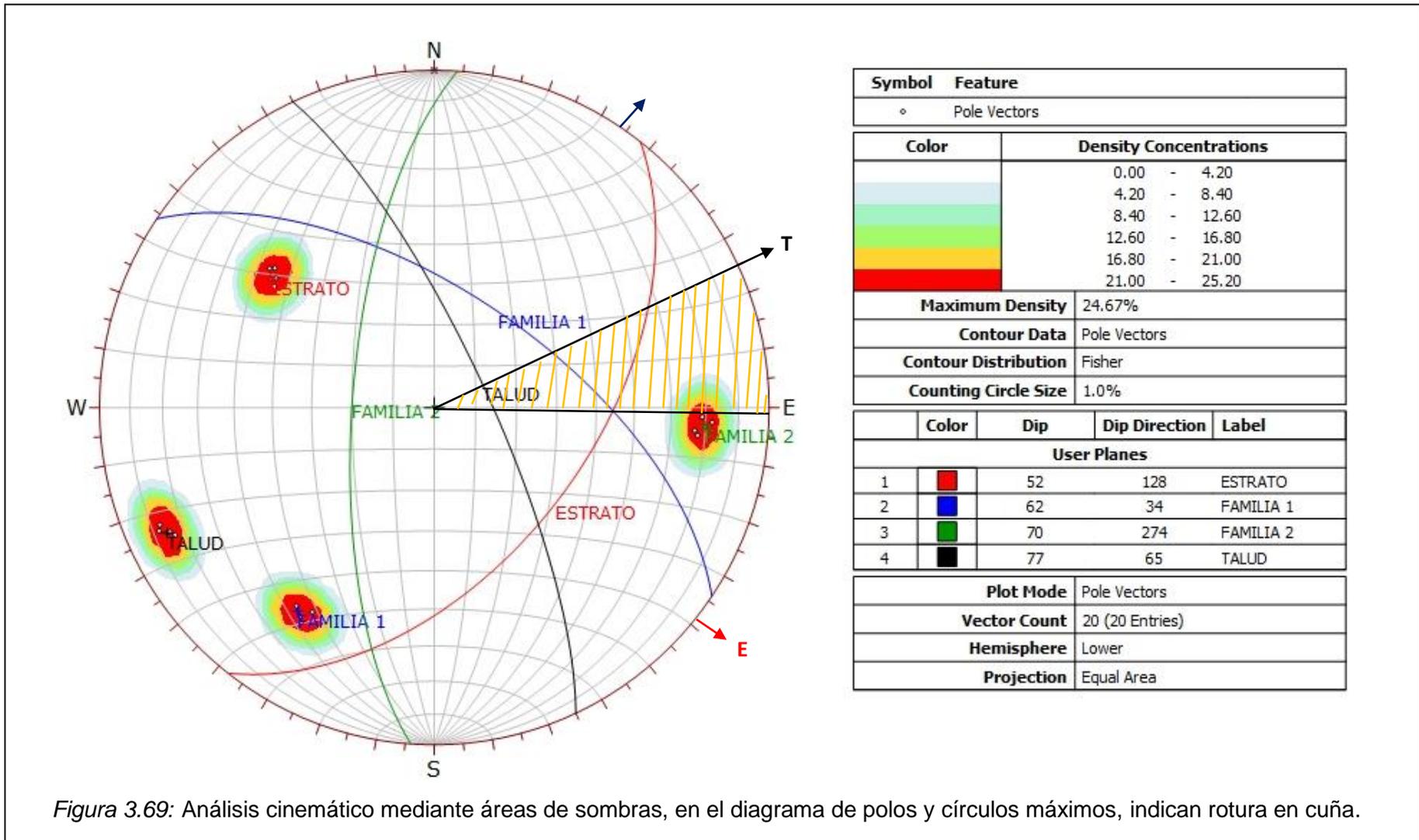
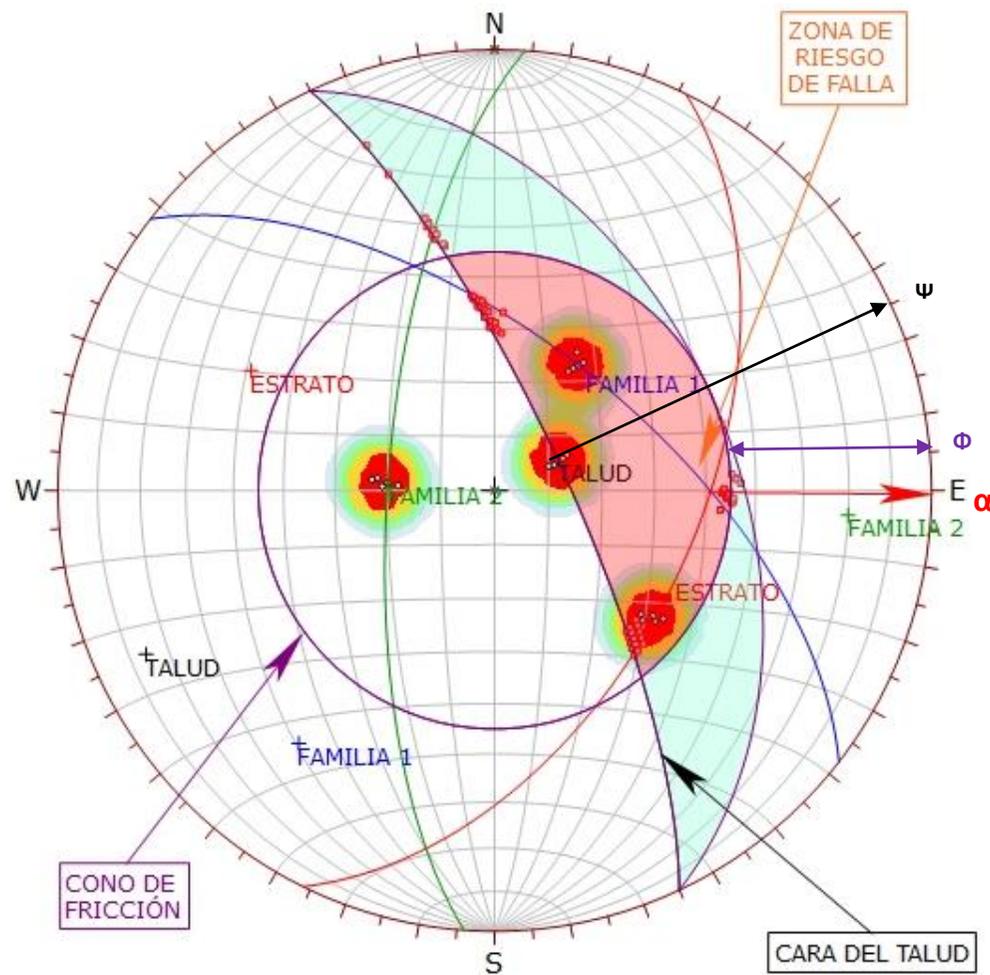


Figura 3.69: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors
▪	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.20
	4.20 - 8.40
	8.40 - 12.60
	12.60 - 16.80
	16.80 - 21.00
	21.00 - 25.20

Maximum Density	24.66%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	77
Slope Dip Direction	65
Friction Angle	45°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	79	190	41.58%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	190
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.70: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimientos de cuña directa.

Análisis Slide v.6

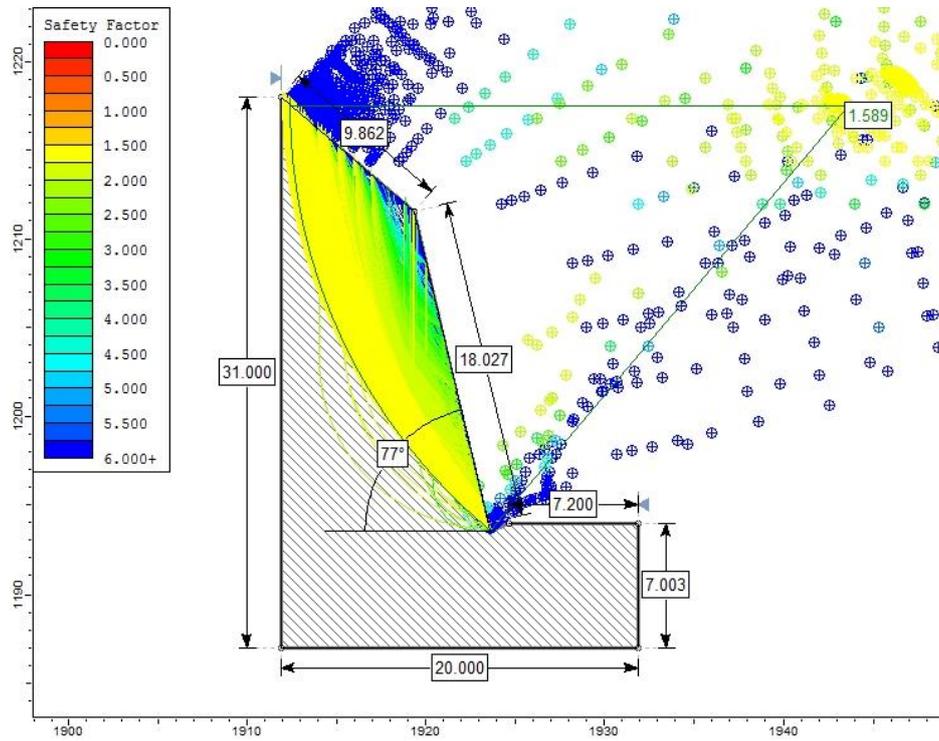


Figura 3.71: Análisis Slide en condiciones normales.

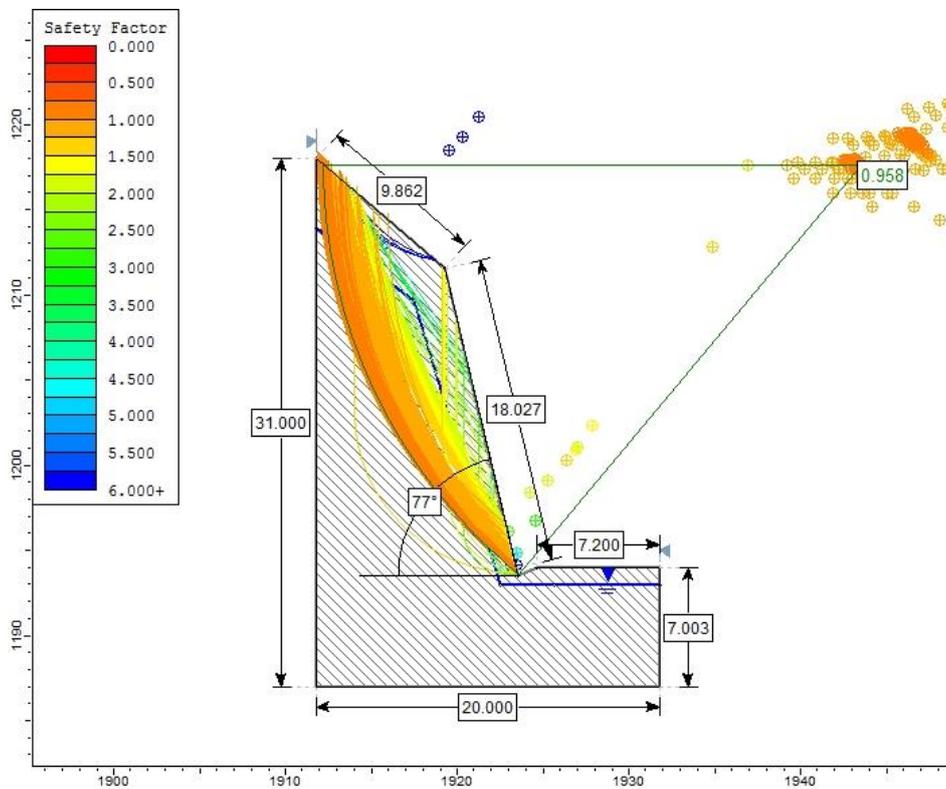


Figura 3.72: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

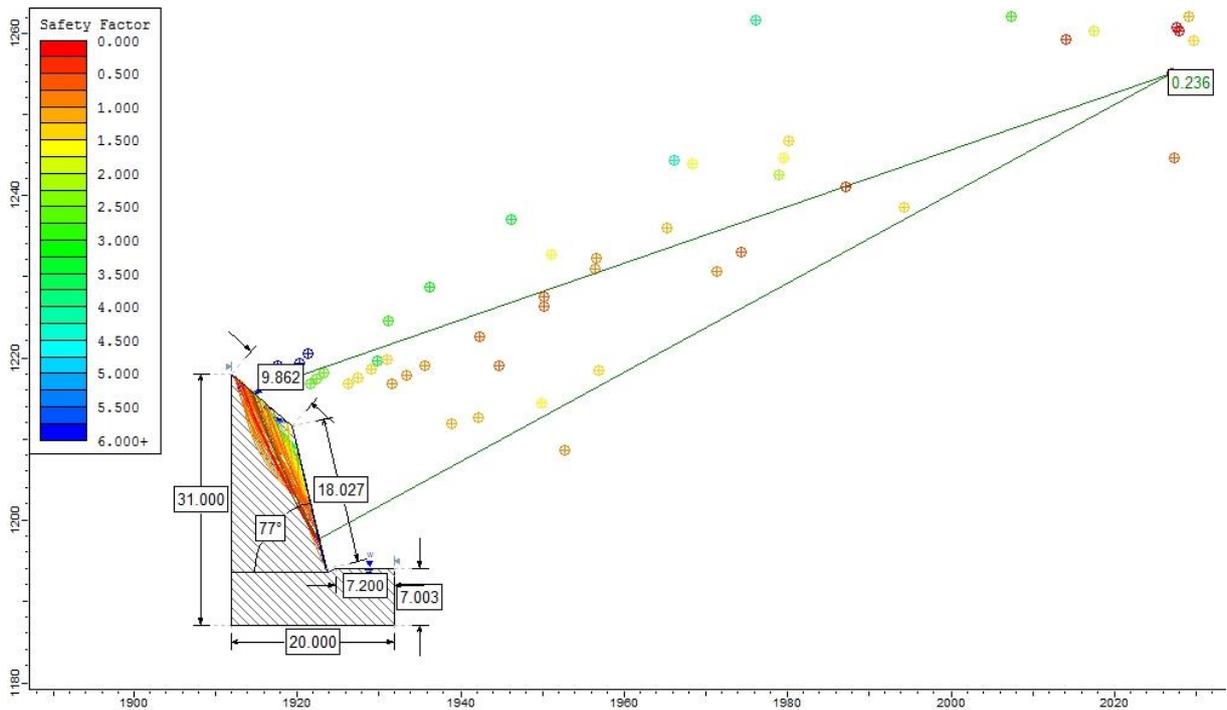


Figura 3.73: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

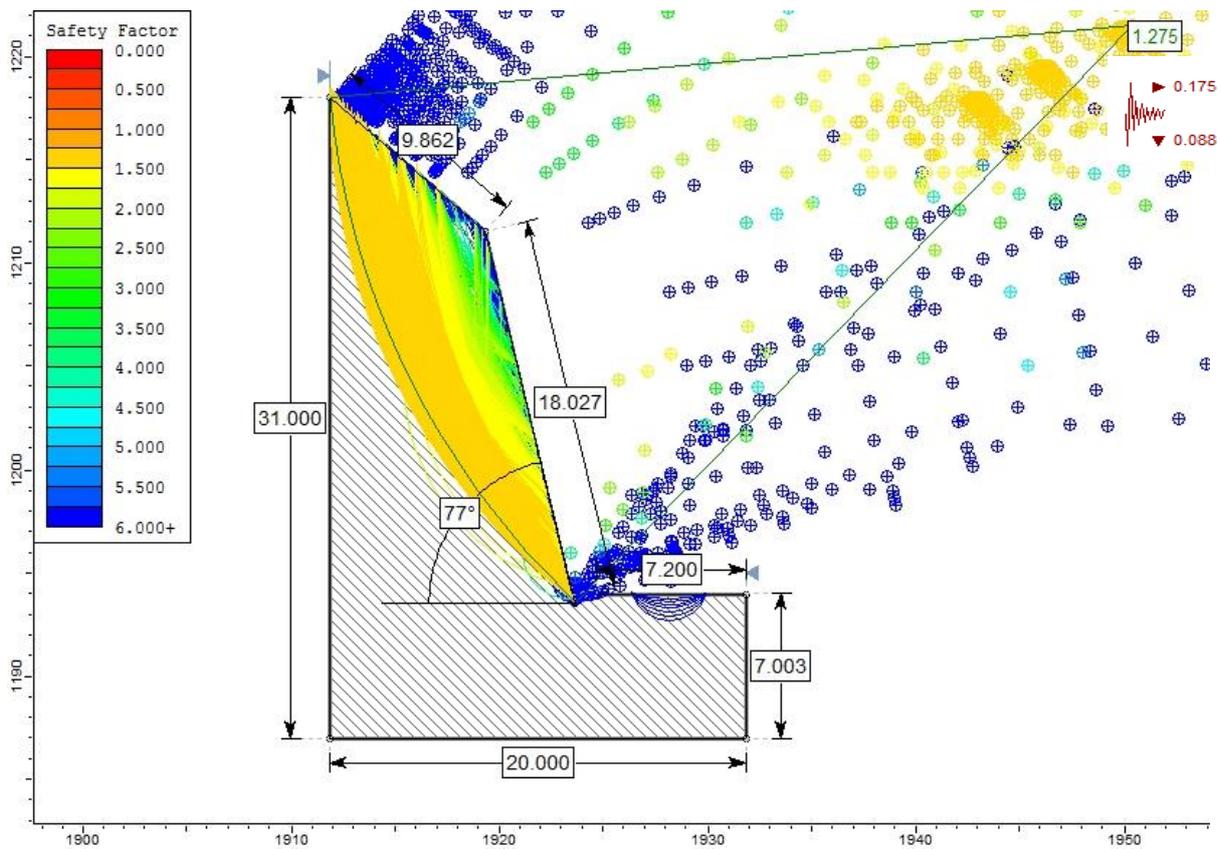


Figura 3.74: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

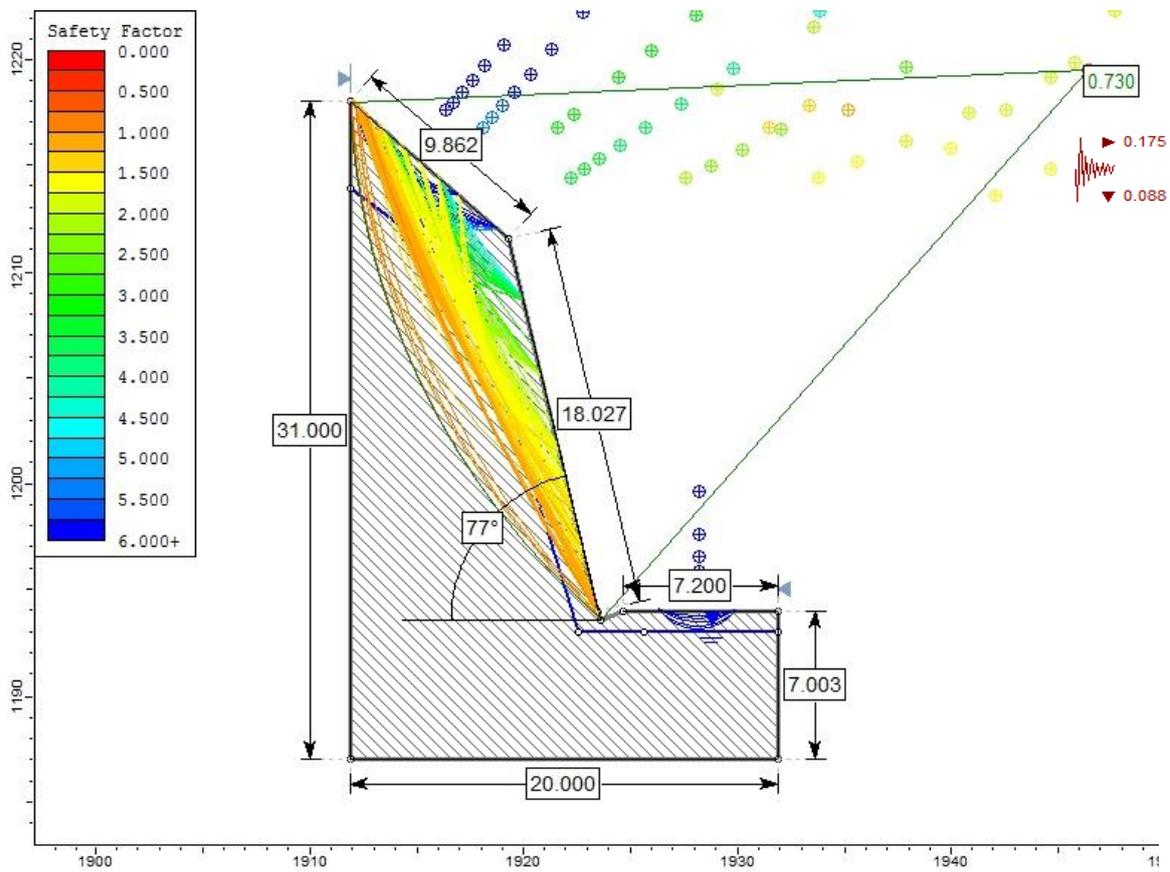


Figura 3.75: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

3.9.8 TRAMO CRÍTICO 08 – PROGRESIVAS Km 135+875 - Km 135+925

Está constituido por calizas bituminosas perteneciente a la Formación Chulec (K_i -ch) con planos de estratificación como se muestra en la Tabla 3.34, conformando tres familias de discontinuidades moderadamente meteorizadas y el estrato buzando a favor del talud. Se evidencian deslizamientos y desprendimientos de rocas, generados por la precipitación y sismicidad, los cuales lo inestabilizan y erosionan de forma planar y cuña.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S	ESTE	NORTE	2092 m.s.n.m
		745469	9276366	



Foto 3.35: Afloramiento de calizas de la Formación Chulec en la progresiva Km 134+875 - Km 134+925.

Tabla 3.34: Caracterización del macizo rocoso y orientación del talud crítico 08.

LITOLÓGÍA / FORMACIÓN	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN		
	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Calizas bituminosas / Chulec	1 = Fresco	1 = Alto	1 = Bloq. regular	ESTRATO	72	4
				FAMILIA 1	82	255
	2 = Leve	2 = Medio	2 = Bloq. Irregular	FAMILIA 2	20	270
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3 = Moderado	3 = Bajo	3 = Bloq. y Capas	ALTURA	22 m	
				PIE	16 m	
	4 = Alto		4 = Frac-intenso	D	76	
				DD	10	
	3	2	2			



Foto 3.36: Perfil del talud en la progresiva Km 134+875.

Tabla 3.35: Asignación de valores para el macizo rocoso, talud crítico 08.

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
RQD (%)	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	13	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	15	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	1
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	7	
VALOR TOTAL RMR						53	

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

La determinación del GSI se realizó mediante la matriz de Hoek, 2013. Porque el macizo rocoso es favorable; el cual está en función del RQD y la condición de las juntas. Como se muestra en la Tabla 3.36.

Tabla 3.36: Estimación del GSI para el talud crítico 08.

ESTIMACIÓN DEL GSI						
CÁLCULO DEL RQD						
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$			ND	L(m)	λ	RQD
			59	5	11.8	66.98
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)						
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND ₈₉	
2	0	5	1	3	11	
GSI=1.5JCOND₈₉ + RQD/2			GSI = 49.99			

Para determinar las propiedades geomecánicas del talud crítico 08 se utilizó el Software RocData v.4 de Rocscience, como se muestra en la Figura 3.76.

Tabla 3.37: Propiedades geomecánicas del talud crítico 08.

PROPIEDADES GEOMECAÑICAS DE LA FORMACIÓN CHULEC					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci (σ)	100 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.641	
GSI	49.99		s	0.001	
mi	10		a	0.506	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.4647	Mpa
Ei	65000 Mpa		ϕ	52.85°	
MR	650	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.111	Mpa
			sigc	2.559	Mpa
			sigcm	10.541	Mpa
			Erm	6968.857	Mpa

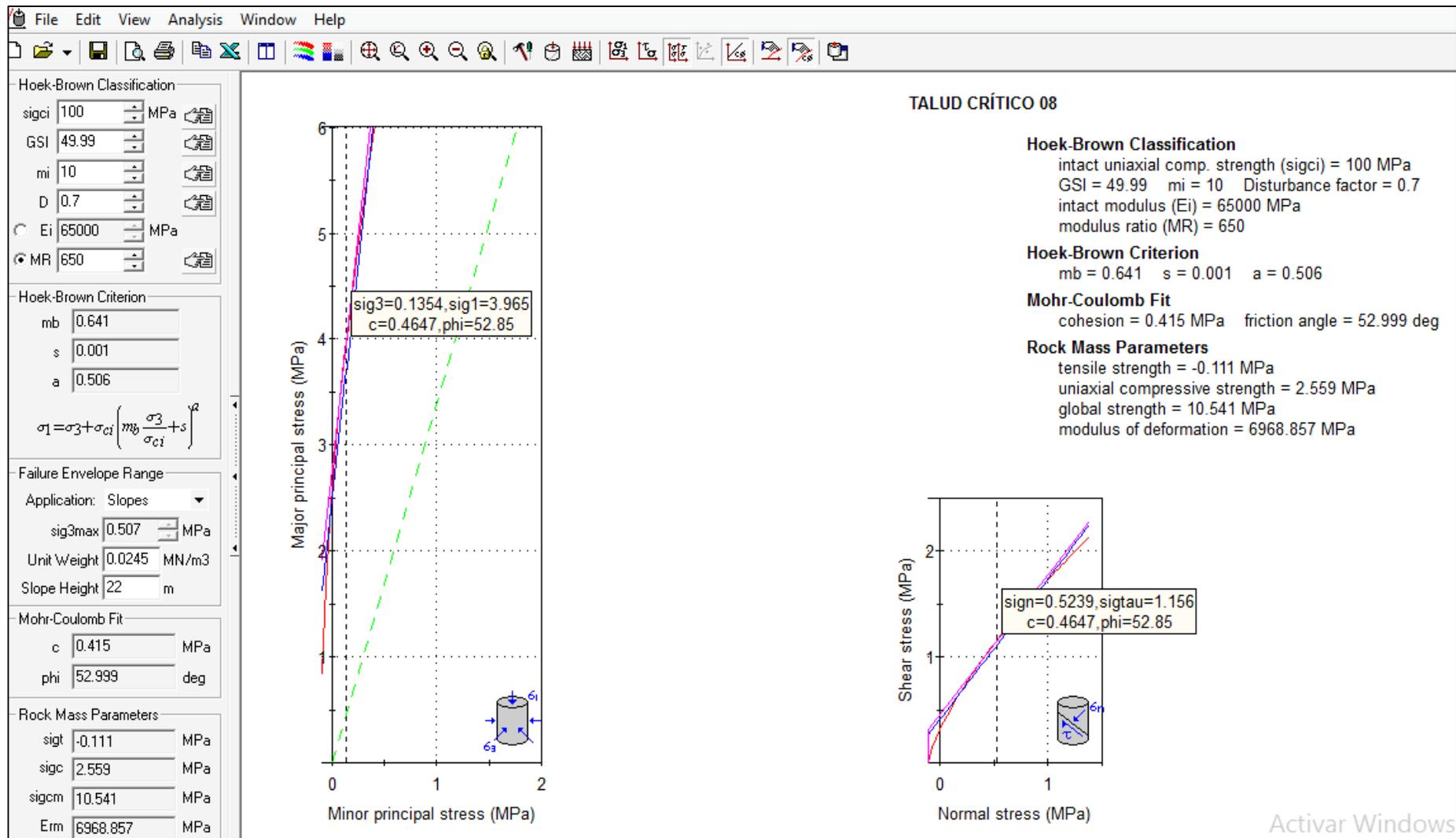


Figura 3.76: Graficas de Esfuerzo Mayor – Esfuerzo Menor (Izquierda) y Esfuerzo Normal – Esfuerzo de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Chulec.

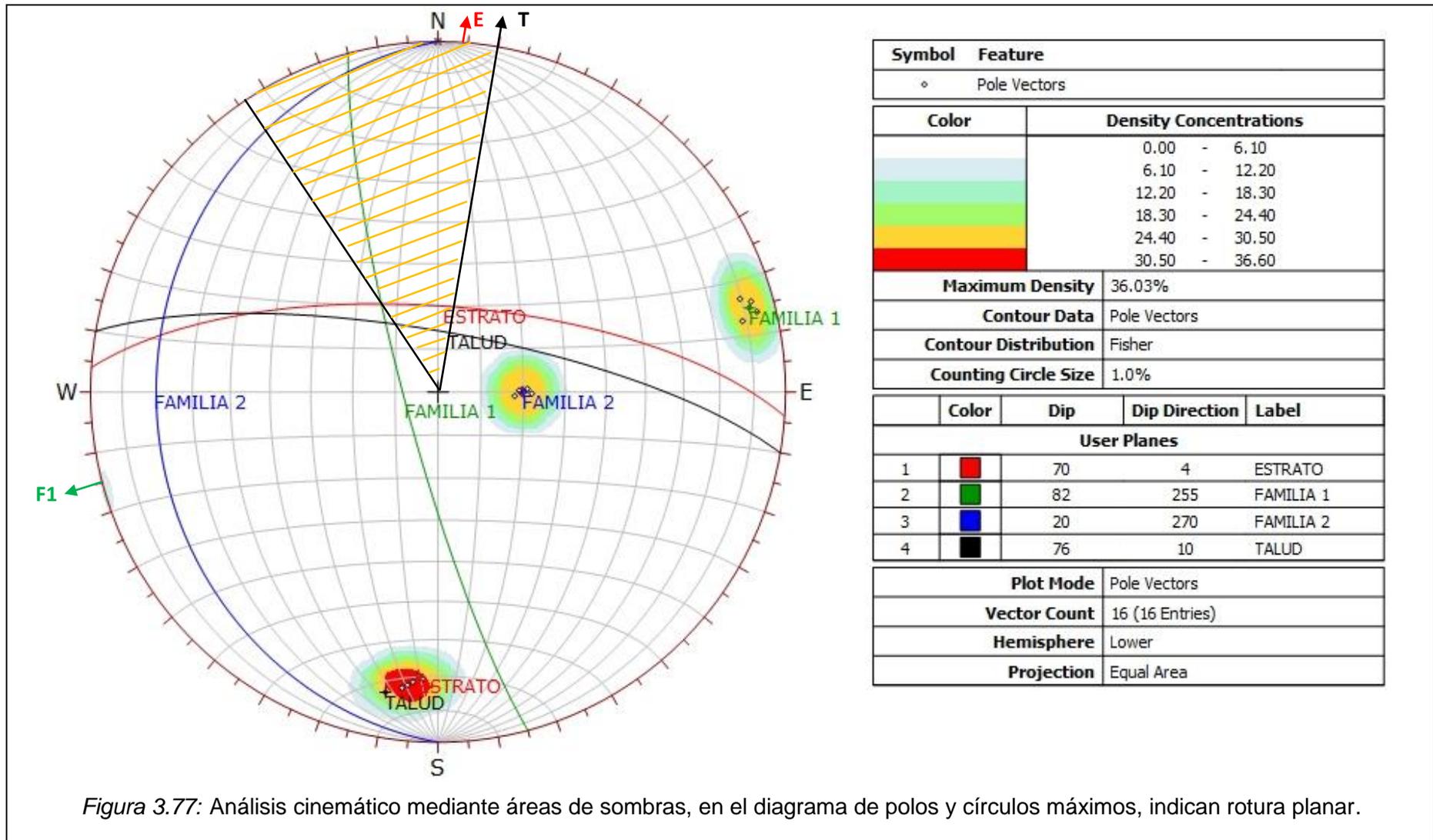


Figura 3.77: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura planar.

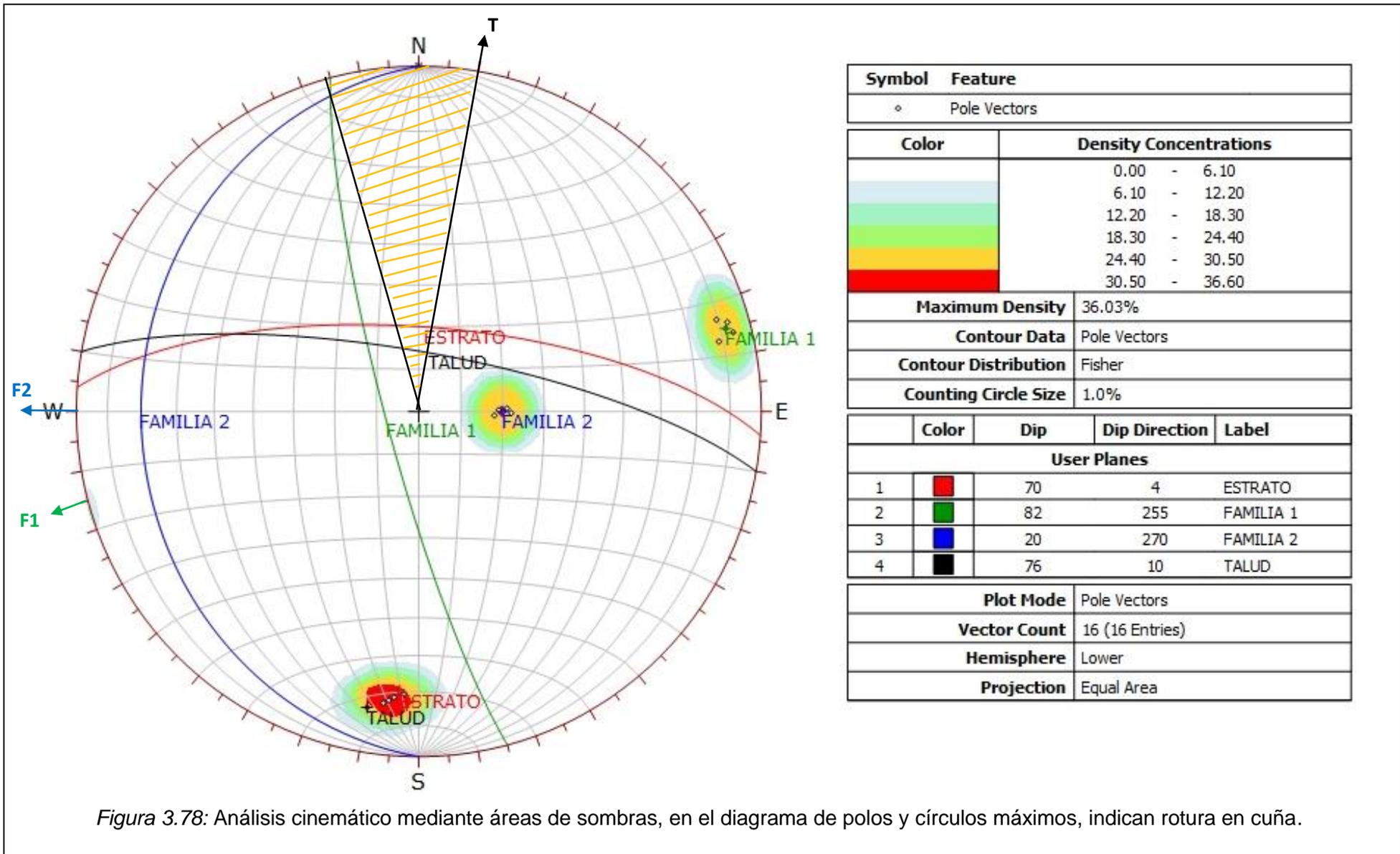
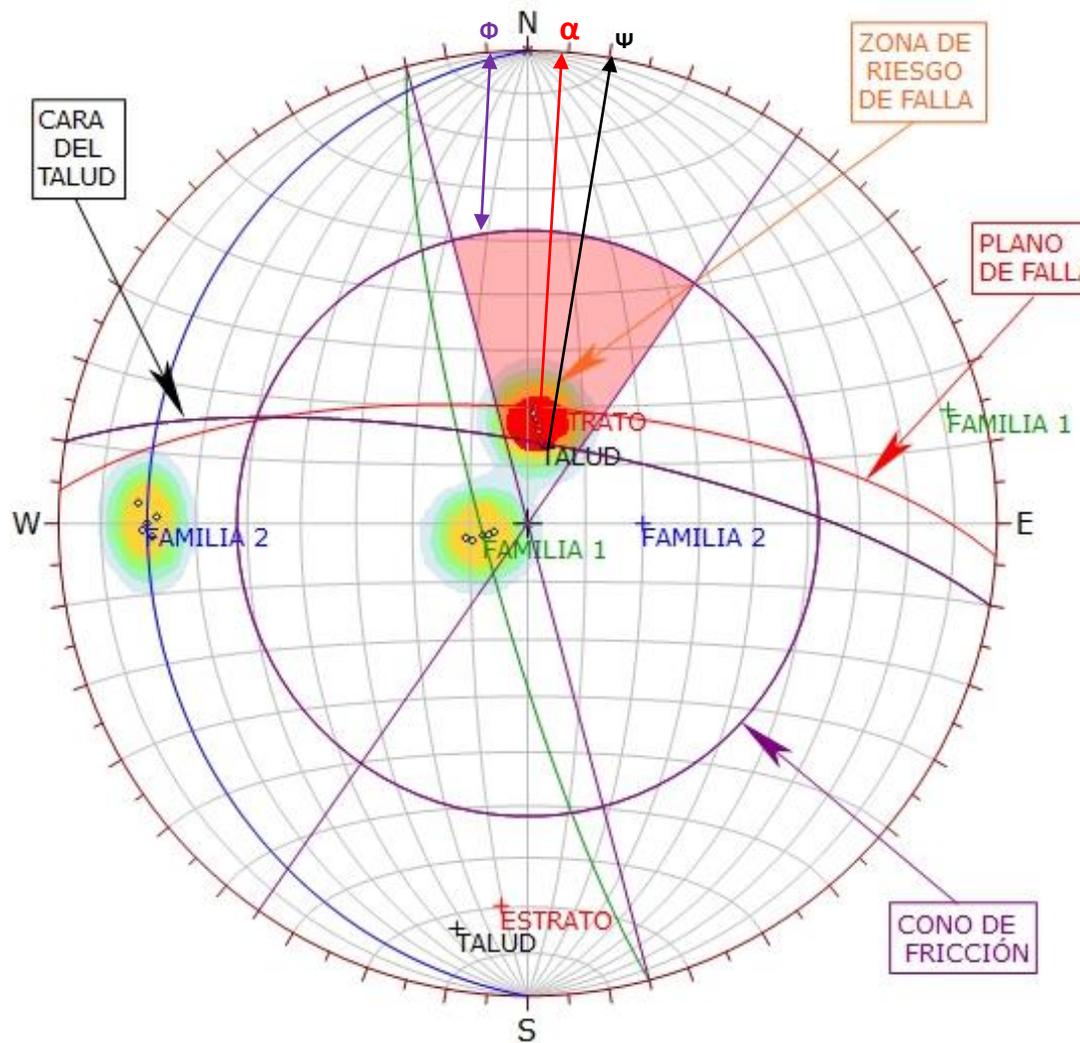


Figura 3.78: Análisis cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indican rotura en cuña.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors

Color	Density Concentrations
Light Blue	0.00 - 6.10
Light Green	6.10 - 12.20
Green	12.20 - 18.30
Yellow	18.30 - 24.40
Orange	24.40 - 30.50
Red	30.50 - 36.60

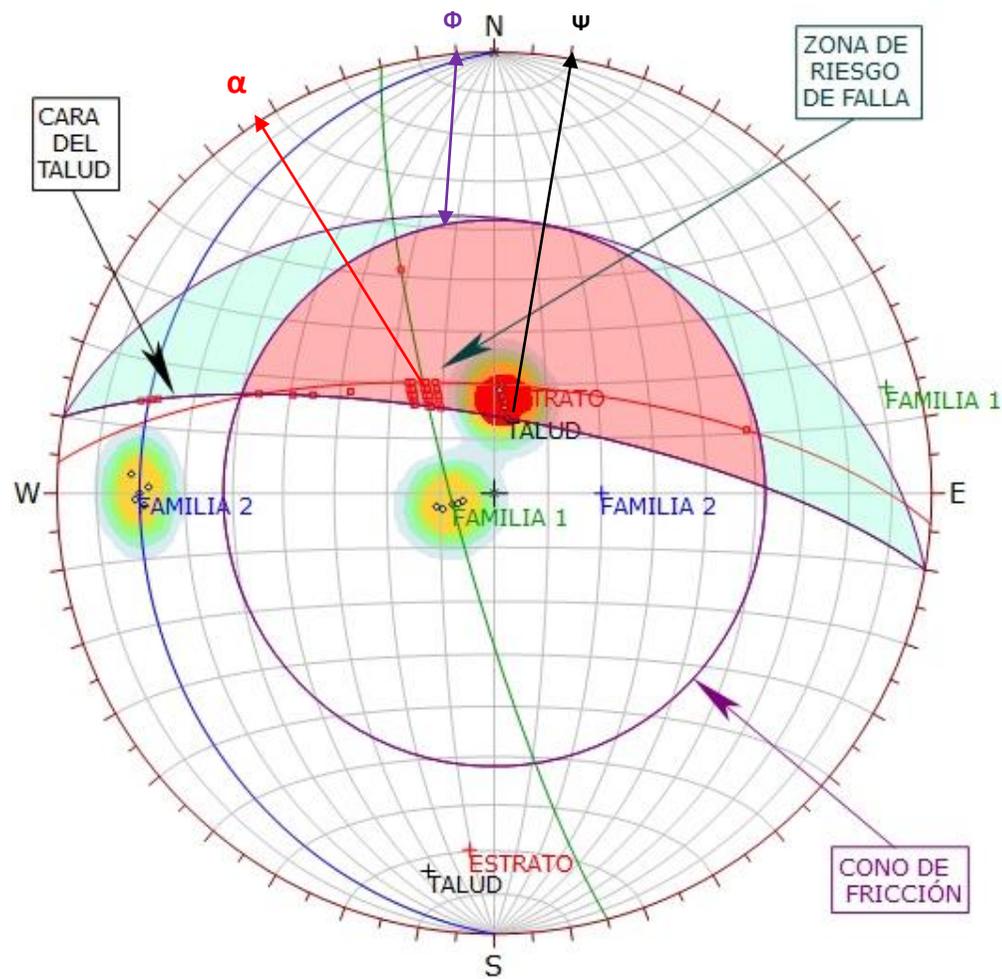
Maximum Density	36.36%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	76
Slope Dip Direction	10
Friction Angle	38°
Lateral Limits	25°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	6	16	37.50%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	16 (16 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.79: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de deslizamiento planar.



Symbol	Feature
◦	Dip Vectors
•	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 6.10
	6.10 - 12.20
	12.20 - 18.30
	18.30 - 24.40
	24.40 - 30.50
	30.50 - 36.60

Maximum Density	36.36%
Contour Data	Dip Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	76
Slope Dip Direction	10
Friction Angle	38°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	40	120	33.33%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	16 (16 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	120
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.80: Análisis de proyección estereográfica respecto al talud, ángulo de fricción y la zona de riesgo de falla, indican probabilidad de desprendimiento de cuña directa.

Análisis Slide v.6

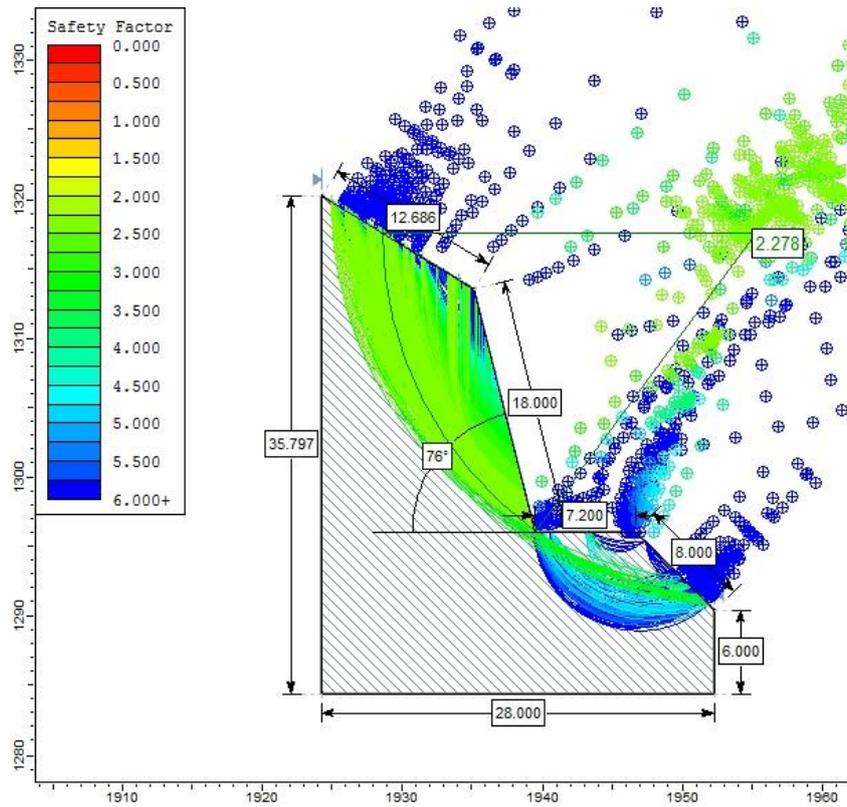


Figura 3.81: Análisis Slide en estado natural.

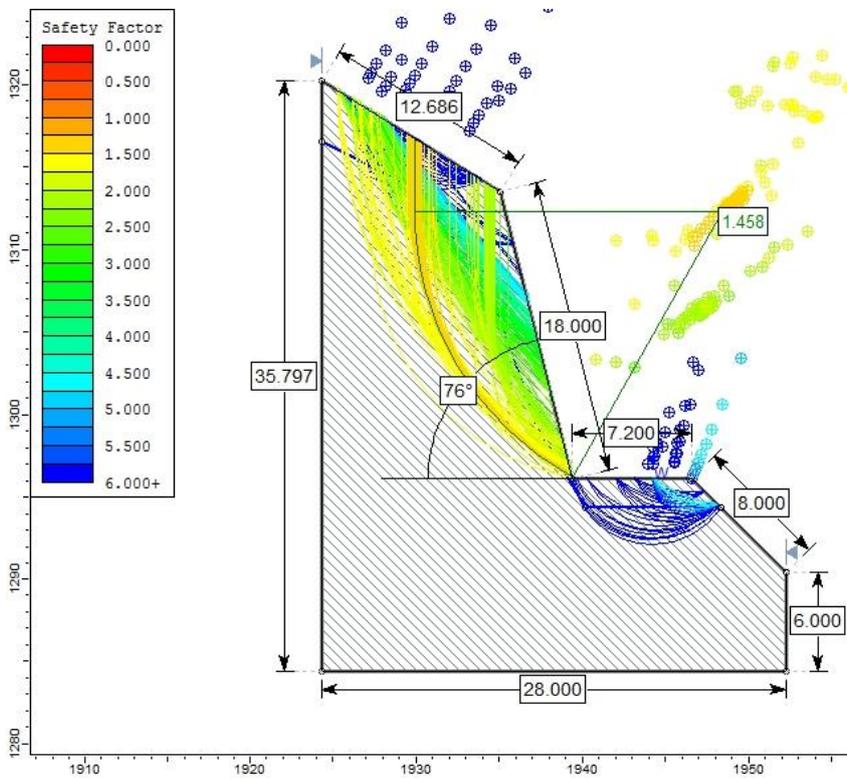


Figura 3.82: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

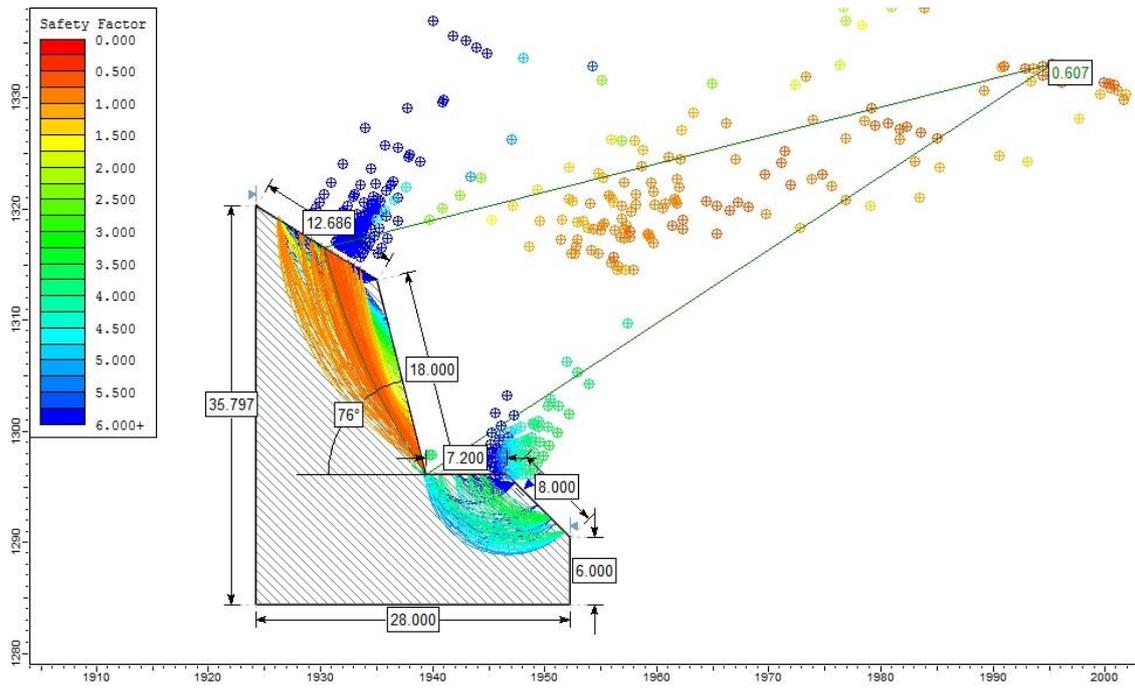


Figura 3.83: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

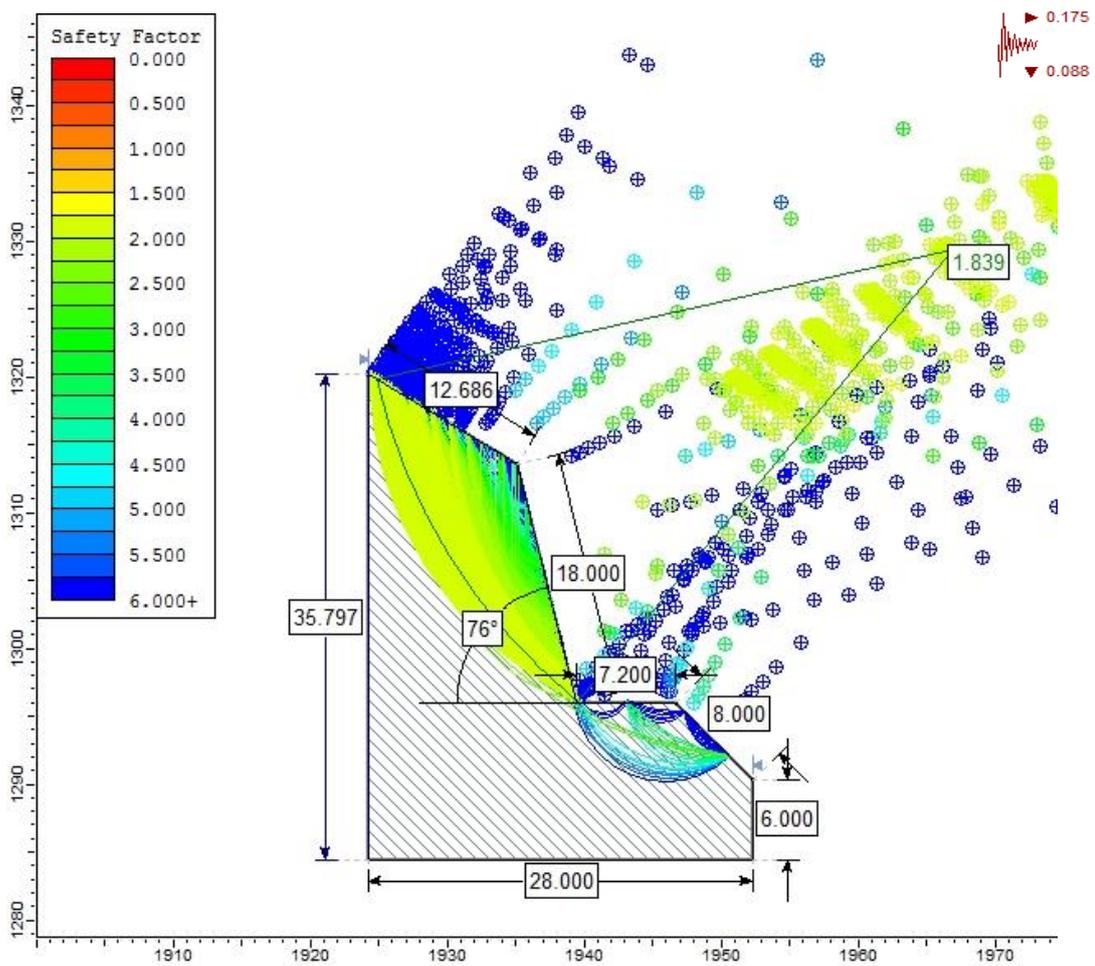


Figura 3.84: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

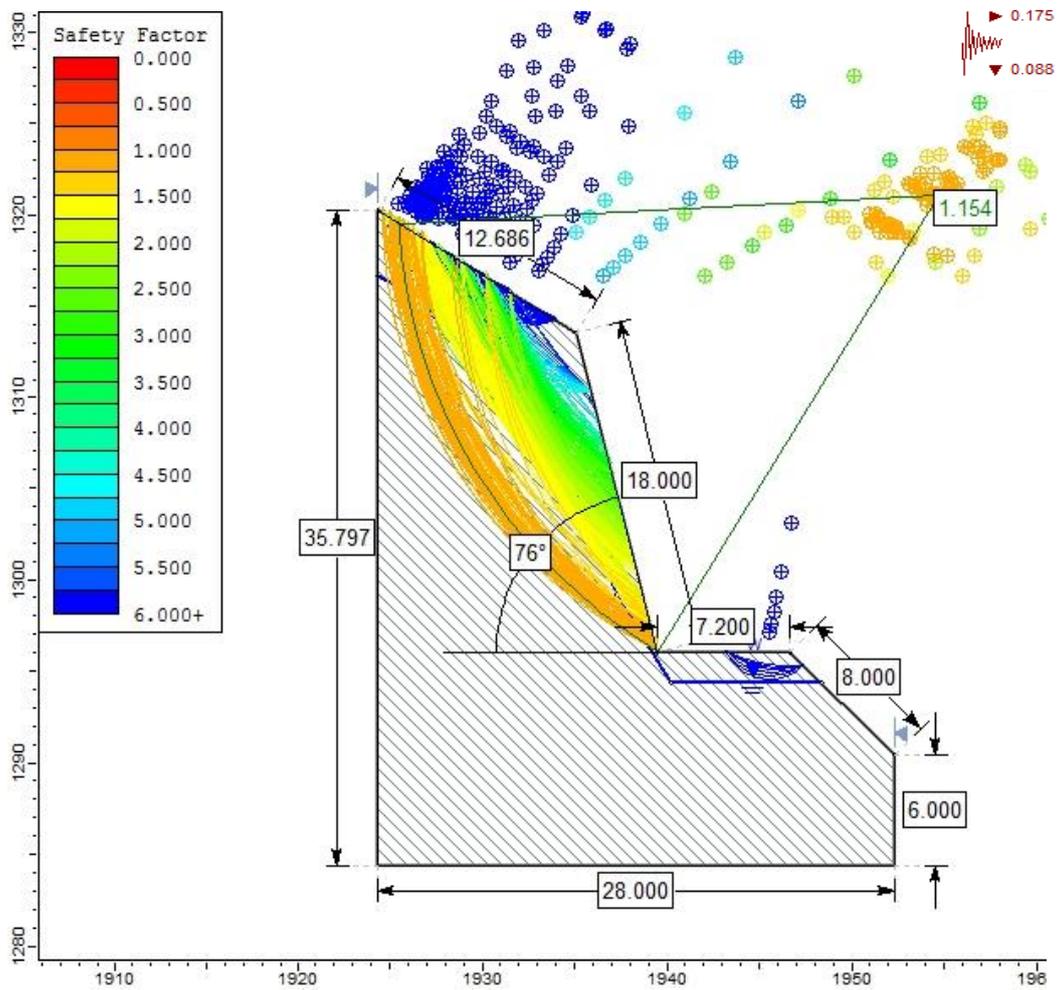


Figura 3.85: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS

Los taludes críticos identificados en el corte de carretera km 135+875 – km 141+575, son inestables y propensos a deslizamientos y desprendimientos de rocas, en especial durante la época de fuertes precipitaciones, esto significa que el IVPC (Instituto Vial Provincial de Chota), organismo encargado del mantenimiento, se debe interesar lo antes posible por este problema que se presenta de manera continua en toda el área de investigación, la cual litológicamente está identificada por: Grupo Goyllarisquizga, Formación Chulec, Inca, Pariatambo, Grupo Pulluicana, Grupo Quilquiñan y Formación Cajamarca.

Caracterizaciones a través de parámetros como: RMR, RQD y GSI, ayudaron en el análisis geomecánico del macizo rocoso; según la caracterización geomecánica RMR₈₉ nos dio como resultado un tipo de calidad de roca: Tipo III, de regular calidad que varían en el rango de 41-60; esto debido a diversos factores o condicionantes tanto internos como externos, y variables de contorno tales como la litología que presenta en área de investigación, variando desde calizas compactas a otras muy fracturas, presentando una meteorización moderada, medio y alto grado de fracturamiento y un GSI de bloques irregulares.

Geomorfológicamente la zona se encuentra definida por planicies, lomadas, laderas y escarpes, tanto al margen izquierdo como derecho del río Chotano. Y principalmente procesos morfológicos como: movimientos de masas, dadas principalmente por deslizamientos y desprendimientos de rocas. Además de quebradas afluentes al río Chotano, con una dirección SE - NW, presentando

una inclinación de 30° - 65°. Estructuralmente se evidencian plegamientos, fallas con dirección SE-NW, que cortan la carretera.

Las secciones elaboradas para la simulación son transversales al eje de la carretera, aquí es importante la geometría del talud, pues estas también determinarían su inestabilidad.

Para la determinación del Factor de Seguridad; con la información obtenida de los taludes críticos se han elaborado modelamientos de perfiles 2D, para ello los parámetros usados para el análisis de rocas por el programa informático geotécnico Slide v.6, usamos el método de análisis de estrés de Hoek y Brown generalizado, concerniente al marco teórico que es básicamente 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, y se expresa en KN/m², 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, de esta manera se calcula automáticamente los valores numéricos “a” y “s”.

El software viene equipado con valores para las constantes para el método de análisis que elijamos. Estos valores han sido recopilados a través de los años por la empresa Rocscience, Inc. En todo el mundo, valores comprobados en campo y en laboratorio.

Otro factor desencadenante que definir en el programa es la cantidad de agua que se tiene presente en el talud, definitivamente podemos asegurar que el agua juega un rol muy importante en épocas de lluvia pues genera las principales causas de inestabilidad. Sin embargo la falta de agua durante la investigación ha determinado que los taludes críticos presenten Factores de Seguridad estables a corto plazo.

Para el análisis de resultados, se utiliza los rangos de factores de seguridad recomendados por Hoek, 2007.

Tabla 4.1: Rangos de Factores de Seguridad, recomendados por Hoek, 2007.

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

Fuente: Hoek, E. 2007.

4.1.1 ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO – CINEMÁTICO

Para determinar las zonas de riesgo de falla de los taludes críticos, se analizó las familias de discontinuidades críticas con buzamiento a favor del talud, en el caso de probabilidad de deslizamiento por roturas planares; la línea de intersección de las discontinuidades críticas buzando a favor del talud, para el caso de probabilidad de desprendimientos por rotura en cuña. Ambas probabilidades de inestabilidad condicionadas con el ángulo de fricción interno.

El análisis muestra probabilidad de ocurrencia de desprendimientos de cuña, deslizamientos planares, baja probabilidad de ocurrencia de volcamientos flexurales y muy baja probabilidad de volcamiento directo.

Tabla 4.2: Análisis Estereográfico – Cinemático de los taludes críticos.

TALUD CRÍTICO	ESCENARIO	PORCENTAJE (%)
01	Desprendimiento de cuña	53.68
	Deslizamiento planar	40
	Volcamiento flexural	20
	Volcamiento directo	15.26
02	Desprendimiento de cuña	54.21
	Deslizamiento planar	50
	Volcamiento flexural	5
	Volcamiento directo	2.11
03	Desprendimiento de cuña	50.00
	Deslizamiento planar	40
	Volcamiento flexural	25
	Volcamiento directo	14.74
04	Desprendimiento de cuña	57.37
	Deslizamiento planar	40
	Volcamiento flexural	15
	Volcamiento directo	0.53
05	Desprendimiento de cuña	42.63
	Deslizamiento planar	40
	Volcamiento flexural	25
	Volcamiento directo	14.21
06	Desprendimiento de cuña	41.58
	Deslizamiento planar	35
	Volcamiento directo	16.32
	Volcamiento flexural	0.00
07	Desprendimiento de cuña	45.26
	Deslizamiento planar	15
	Volcamiento flexural	0.00
	Volcamiento directo	0.00
08	Deslizamiento Planar	37.50
	Desprendimiento de cuña	33.33
	Volcamiento flexural	0.00
	Volcamiento directo	4.17

4.1.2 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE MEDIANTE SOFTWARE SLIDE V. 6.0

➤ Los taludes críticos con evidente potencial de deslizamiento planar y desprendimientos de cuña fueron analizados por el método de equilibrio límite de dos dimensiones con el software Slide V.6.

Se puede discernir que:

- El Talud Crítico 01 muestra estado inestable frente a saturación total y estable relativo frente a la combinación de sismicidad máxima y saturación parcial.

TALUD CRÍTICO 01					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
90 Mpa	45.32	0.3048 Mpa	51.78°	4669.459 Mpa	Cuña y Planar

- El Talud Crítico 02 es inestable frente a saturación total, es estable relativo en condiciones de sismicidad máxima y sismicidad máxima más saturación parcial, en estado natural y saturación parcial es estable a corto plazo.

TALUD CRÍTICO 02					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
90 Mpa	44.59	0.3491 Mpa	47.48°	4464.227 Mpa	Cuña y Planar

- El Talud Crítico 03 es estable a corto plazo en condiciones de saturación total y frente a condiciones de sismicidad máxima más saturación parcial.

TALUD CRÍTICO 03					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
85 Mpa	46.52	0.2894 Mpa	53.35°	5117.869 Mpa	Cuña y Planar

- El Talud Crítico 04 es inestable en condiciones de saturación parcial, saturación total, y sismicidad máxima más saturación parcial, es estable a corto plazo frente a sismicidad máxima.

TALUD CRÍTICO 04					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
100 Mpa	48.63	0.4423 Mpa	52.02°	7371.906 Mpa	Cuña y Planar

- El Talud Crítico 05 es inestable frente a condiciones de saturación total, es estable relativo frente a saturación parcial y sismicidad máxima más saturación parcial.

TALUD CRÍTICO 05					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
100 Mpa	49.27	0.3995 Mpa	54.24°	6655.212 Mpa	Cuña, Planar y Vuelco

- El Talud Crítico 06 es inestable frente a condiciones de saturación total y sismicidad máxima más saturación parcial, es estable relativo frente a saturación parcial.

TALUD CRÍTICO 06					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
85 Mpa	43.9	0.2613 Mpa	51.67°	4042.524 Mpa	Cuña y Planar

- El Talud Crítico 07 es inestable frente a condiciones de saturación total, saturación parcial, sismicidad máxima más saturación parcial, en estado de sismicidad máxima es estable a corto plazo.

TALUD CRÍTICO 07					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
70 Mpa	38.89	0.2008 Mpa	45.74°	2299.974 Mpa	Cuña y Planar

- El Talud Crítico 08 es inestable frente a condiciones de saturación total, es estable relativo frente a sismicidad máxima más saturación parcial, es estado de saturación parcial es estable a corto plazo.

TALUD CRÍTICO 08					
σ_{ci}	GSI	C'	ϕ'	E_m	ROTURA
100 Mpa	49.99	0.4647 Mpa	52.85°	6968.857 Mpa	Cuña y Planar

Tabla 4.3: Análisis de perfiles de los taludes críticos.

TALUD CRÍTICO	ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD - MÉTODO			
		Morgenstern - Price	Spencer	Bishop	Promedio
01	Estado Natural	2.399	2.410	2.383	2.397
	Saturación Parcial	1.636	1,656	1.721	1.671
	Saturación Total	0.974	1.008	0.998	0.993
	Sismicidad Máxima	1.959	2.147	1.940	2.015
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.277	1.317	1.337	1.310
02	Estado Natural	1.472	1.479	1.416	1.455
	Saturación Parcial	1.353	1.372	1.357	1.360
	Saturación Total	0.902	0.880	0.821	0.867
	Sismicidad Máxima	1.220	1.181	1.141	1.180
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.013	1.181	1.11	1.101
03	Estado Natural	2.165	2.162	2.118	2.148
	Saturación Parcial	1.873	1.895	1.876	1.881
	Saturación Total	1.365	1.386	1.369	1.373
	Sismicidad Máxima	2.062	2.058	2.020	2.046
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.403	1.435	1.429	1.422
04	Estado Natural	1.882	1.957	1.764	1.867
	Saturación Parcial	0.801	0.812	0.811	0.808
	Saturación Total	0.215	0.243	0.120	0.192
	Sismicidad Máxima	1.459	1.456	1.432	1.449
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.934	0.934	0.578	0.815
05	Estado Natural	2.170	2.186	2.096	2.150
	Saturación Parcial	1.287	1.337	1.280	1.301
	Saturación Total	0.322	0.315	0.270	0.302
	Sismicidad Máxima	1.732	1.732	1.726	1.730
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.998	0.996	1.010	1.001
06	Estado Natural	1.930	1.922	1.892	1.914
	Saturación Parcial	1.083	1.138	1.196	1.139

TALUD CRÍTICO	ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD - MÉTODO			
		Morgenstern - Price	Spencer	Bishop	Promedio
07	Saturación Total	0.248	0.248	0.146	0.214
	Sismicidad Máxima	1.531	1.588	1.540	1.553
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.911	0.892	0.933	0.912
	Estado Natural	1.741	1.739	1.589	1.689
	Saturación Parcial	0.958	0.970	0.964	0.964
	Saturación Total	0.236	0.236	0.121	0.197
	Sismicidad Máxima	1.360	1.336	1.275	1.323
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	0.730	0.730	0.748	0.736
	Estado Natural	2.387	2.404	2.278	2.356
	Saturación Parcial	1.458	1.492	1.530	1.493
	Saturación Total	0.607	0.591	0.438	0.545
	Sismicidad Máxima	1.856	1.853	1.839	1.849
	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	1.154	1.154	1.218	1.175

4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante la investigación se contrastó la hipótesis, la cual se afirma que el comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas – El Tayal, está condicionada por las características de los factores litológicos: calizas de las Formaciones Chulec, Pariatambo, Grupo Pulluicana, Grupo Quilquiñan, y Formación Cajamarca; las cuales se encuentran muy fracturadas, según el RMR_{89} Tipo III, de regular calidad que varían en el rango de 41-60; factores geométricos como ángulo de pendiente del talud; y por sus factores geomecánicos con predominancia de materiales dúctiles sobre frágiles; las variables detonantes de sismicidad e infiltración, esta última en tiempos de fuertes precipitaciones; obteniendo como resultado deslizamientos y desprendimientos de rocas. Por ello se confirma que se entra en una zona geotécnicamente inestable.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Afloran rocas de la Formación Carhuaz, Inca, Chulec, Pariatambo, Grupo Pulluicana, Grupo Quilquiñan y Formación Cajamarca, depósitos cuaternarios aluviales, fluviales y coluviales. Estratificación a favor del buzamiento del talud, moderadamente meteorizadas, dando lugar a geoformas en su mayoría tipo laderas.

- El comportamiento litomorfoestructural de la carretera Lajas – El Tayal, es compleja por la presencia de estructuras como plegamientos fuertemente disturbados, que originan fallamientos y alto grado de fracturamiento en los macizos rocosos inestabilizando el talud.

- Las propiedades geomecánicas de los taludes críticos se determinó mediante el software RocData, para ello la caracterización del macizo rocoso fue indispensable; como la resistencia a la compresión simple (MPa), Índice de Resistencia Geológica (GSI).

- El comportamiento geotécnico de los taludes críticos es sumamente complejo por el medio y alto grado de fracturamiento de las rocas, disposición de las discontinuidades e influenciado principalmente por el alto ángulo de talud que presentan, definiendo su inestabilidad.

- El análisis cinemático – geotécnico de Software Dips v.6, de las discontinuidades críticas y el ángulo de fricción, nos determina mayor

probabilidad de desprendimientos por rotura en cuña que de deslizamientos por rotura planar.

➤ Los Factores de Seguridad obtenidos en el programa informático Slide v.6, analizados en los cinco escenarios son: Los taludes críticos 01, 02, 05, 06, 07 y 08 son inestables en condiciones de saturación total, $FS = < 1$; los taludes críticos 01, 02, 05, 08 son estables relativos en condiciones de saturación parcial y saturación parcial más sismicidad $FS=1.0-1.3$; los taludes críticos 02, 04, 07 y 08 son estables a corto plazo en condiciones de saturación parcial y sismicidad máxima $FS = 1.3 -1.5$. Y la zonificación de inestabilidad respectiva.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos triaxiales para obtener mayor precisión en las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, porque las pruebas de resistencia cuantitativas realizadas en campo inevitablemente generan margen de error.

- Monitoreo constante entre los meses de febrero – abril y setiembre – noviembre debido a que las precipitaciones pluviales son mayores, con el fin de determinar y direccionar el drenaje.

- Se recomienda al IVPC (Instituto Vial Provincial de Chota) realizar un nuevo perfilamiento de los 08 tramos críticos, que por su altura, ángulo y la meteorización de las rocas son propensas a deslizamientos y desprendimientos de rocas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Corominas, J. 1997. *Tipos de rotura en laderas y taludes*.
- Dávila Burga, J. 2001. *Diccionario geológico*. Perú.
- Deere, DU. 1989. *Rock Quality Designation (RQD) After twenty years*. Florida.
- Gavilanes, H., & Andrade, B. 2004. *Introducción a la Ingeniería de Túneles*. Quito-Ecuador: AIME.
- GEMMA. 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas 1ra. Edición*. Toronto, Canadá: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas.
- González de Vallejo, L. 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson.
- Hoek, E., Carranza Torres, C., & Corkum, B. 2002. *El criterio de rotura de Hoek - Brown - Edición 2002*. Minnsesota.
- Hoek, E. 2013. *Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*.
- Laín, R. 2004. *Rotura planar y rotura en cuña*. Madrid, España.
- Marinos, P., Marinos, V., & Hoek, E. 2007. *El Índice de Resistencia Geológica (GSI): Una Herramienta de Caracterización para la Evaluación de las Propiedades Ingenieriles de Macizos Rocosos*. Canadá: Rocscience.
- Mercado, R. 2014. *"Análisis de inestabilidad de taludes en zonas críticas en la carretera Cajamarca – Celendín en el tramo Km. 52+000 – Km 94+400"*. Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 85p.

- Montoya, FR. 2014. *“Evaluación Geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca - El Gavilán. Cajamarca”*, Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 151p.
- Rodríguez, R. 2016. *Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona ronquillo corisorgona Cajamarca - Perú*. Lima, Perú.
- Rodrigo, LR. 2017. *Realizó el estudio “Análisis de estabilidad de taludes en la carretera Lajas – Ajipampa”*. Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 52p.
- Sáenz, EJ. 2015: *“Evaluación geotécnica de los taludes en el tramo de carretera El Gavilán – Chigden”*, Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 56p.
- Suárez, J. 2007. *Deslizamientos - Análisis Geotécnico*. Colombia: U. Industrial de Santander.
- Wilson, J. 1984. Boletín N° 38: *Geología de los cuadrángulos de Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepén (15-e)*. Lima, Perú: INGEMMET.

ANEXOS

A. TABLAS DE REGISTRO GEOMECÁNICO - GEOTÉCNICO

B. PLANOS

PLANO DE ACCESIBILIDAD	01
PLANO DE UBICACIÓN	02
PLANO MDE (MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN)	03
PLANO GEOMORFOLÓGICO ALTITUDINAL	04
PLANO DE UNIDADES GEOMORFONEGÉTICAS	05
PLANO GEOLÓGICO	06
PLANO GEOTÉCNICO	07
PLANO DE ZONIFICACIÓN	08