

Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-0740-2022

Clasificación, caracterización y análisis cinemático de la sección conformada por un talud ubicado en el kilómetro 46+200, Ruta Nacional No.27, San José - Caldera

INFORME FINAL



Preparado por:

Ing. Laura Solano Matamoros
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica
Junio, 2022





Contenido

I. Introducción	4
II. Antecedentes	4
III. Levantamiento en campo	5
III.1 Modelo de elevación digital	7
IV. Caracterización y clasificación del talud de roca	8
IV.1 Clasificación RMR "Rock Mass Rating"	9
IV.2 Clasificación SMR "Slope Mass Rating"	10
IV.3 Sistema de clasificación Q	11
V. Análisis cinemático	12
V.1 Proyección estereográfica	12
V.2 Determinación de factores de seguridad	17
VI. Condición actual del talud	20
VII. Comentarios finales	22
VIII. Referencias	24
IX. Control de cambios	25



Clasificación, caracterización y análisis cinemático de la sección conformada por un talud de roca ubicado en el kilómetro 46+200, Ruta Nacional No.27, San José - Caldera

I. Introducción

El presente informe muestra los resultados preliminares de la clasificación, caracterización y análisis cinemático del talud de roca ubicado en el kilómetro 46+200 de la Ruta Nacional No. 27 (RN-27).

La información para la clasificación y caracterización de las familias de discontinuidades representativas del macizo rocoso fue recolectada mediante observación y levantamientos en campo y la aplicación de metodologías aptas para la caracterización y clasificación de las familias de discontinuidades de un macizo rocoso. Adicionalmente, se complementó la información de las discontinuidades y características del talud con el procesamiento de imágenes actualizadas de alta definición obtenidas a partir del vuelo realizado con el VANT del LanammeUCR.

Con esta información se procede a reproducir mediante un procedimiento geométrico la representación en dos dimensiones (2D) de los principales planos y líneas de discontinuidades del macizo rocoso. Con esta información y a partir de las intersecciones de los planos de las discontinuidades, es posible clasificar la tipología de la probable falla del talud. Además, se determina un factor de seguridad (FS) preliminar a partir de los resultados obtenidos en la proyección 2D.

Cabe destacar que los resultados obtenidos tanto de los levantamientos en campo como de los análisis realizados son de carácter preliminar y, por lo tanto, no exime la necesidad de realizar levantamientos y análisis más exhaustivos que permitan obtener resultados más precisos y detallados de la condición del talud, y así poder emitir soluciones específicas para la estabilización del macizo rocoso en cuestión.

A continuación, se comenta a detalle el análisis realizado y los resultados obtenidos.

II. Antecedentes

De acuerdo con el documento LM-PI-UGERVN-3-2015 "Estudio de presencia de drenaje ácido de Rocas (DAR) en taludes de la Ruta Nacional 27", el área de estudio se ubica en Orotina sobre la RNo.27, y corresponde a un Bosque Húmedo Tropical (bh-T) según la clasificación de zonas de vida de Holdridge para Costa Rica. Se indica que las temperaturas superan los 24°C, con un promedio anual de lluvias de entre 1800 y 4000 mm, con una estación seca bien marcada entre los meses de diciembre y mayo. Además de acuerdo con la información disponible en dicho documento, la geomorfología corresponde a una zona montañosa de origen volcánico que cuenta con materiales de la formación Grifo Alto, en las cuales afloran coladas de lavas masivas, afectadas por fallas tectónicas, fracturas, alteración hidrotermal.

El pasado 10 de mayo de 2022, la ruta RNo.27 se mantuvo cerrada entre el distrito de Escobal y Orotina por un deslizamiento ocurrido en el talud de roca ubicado en el km 46+200, en la margen derecha dirección San José – Caldera (ver Figura 1).



Figura 1 Deslizamiento del talud de roca del km 46+200 de la RN-27
Fuente: (El Observador, 2022)

Como se observa en la Figura 1, el material se deslizó sobre el plano de una de las familias de discontinuidades detectadas en el macizo rocoso, y se presume que deja expuesto el material de relleno de la discontinuidad. Este material se sospecha es un material orgánico de origen residual, que se observa de color café oscuro, con evidencia de crecimiento vegetal. Vale la pena comentar que las discontinuidades con relleno generalmente se clasifican como una condición crítica y eventualmente desfavorable para la estabilidad de un talud en macizos rocosos.

III. Levantamiento en campo

Teniendo en consideración los antecedentes del sitio, el Programa de Ingeniería Geotécnica (PIG) del LanammeUCR procedió a realizar una gira de campo al sitio, con el fin de realizar un levantamiento de la orientación y características de las discontinuidades del macizo rocoso y del talud en general. Esta se llevó a cabo el día 12 de mayo de 2022, y al llegar al sitio se encuentra que el material caído fue removido del pie del talud y la carretera. Parte de este material fue colocado en la corona del talud en la margen izquierda de la carretera, dirección San José – Caldera.

En la Figura 2 se muestra la condición del talud el día de la gira de campo. Se observa que todo el material caído ha sido limpiado de la zona. Además, en esta misma figura se señalan las cuatro principales familias de discontinuidades identificadas durante el levantamiento en campo, previo a la construcción de la proyección estereográfica propia del sitio.



Figura 2 Condición actual del talud y familias de discontinuidades.

Debido a las condiciones del sitio y en específico del talud, para el levantamiento de las discontinuidades del macizo rocoso se seleccionaron zonas representativas de afloramiento de tres de las familias de discontinuidades (J1, J2, J3) y se realizó el levantamiento de los siguientes parámetros: orientación, espaciamiento, continuidad o persistencia, rugosidad, abertura, relleno, presencia de flujo de agua, y con el martillo Schmidt se estimó la resistencia de las paredes de la discontinuidad. En la Tabla 1 se muestra el resumen de las características de las discontinuidades obtenidas en campo. La orientación de la pendiente del talud se determinó con respecto a la pendiente de corte que se conformó durante la construcción de la carretera.

Tabla 1 Resumen de datos del levantamiento en campo

Familia	Orientación		Espaciamiento (m)	Persistencia (m)	Rugosidad (JRC)	Abertura (cm)	Relleno	Flujo de agua	Resistencia (MPa)
	Dip	Dip.Dir							
J1	62	254	1,6	4,4	18 a 20	1			
J1	40	227	2,6	4	16 a 18	-	Sí	Sí	-
J1	60	200	-	5,2	-	-			
J2	50	30	0,87	1,75	8 a 10	< 0,1			
J2	49	30	0,88	2,2	8 a 10	<0,1			
J2	52	30	1,01	1,7	-	<0,1	Si	sí	-
J2	47	30	-	-	-	<0,1			
J3	84	162	0,95	3,4	4 a 6	-	No	No	78
J3	85	148	1,66	3,6	2 a 4	-			77,2
J4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J1	70	-							
J1	64	-							
J1									
TALUD	77	135							88,7



Se recolectaron dos muestras de roca para la determinación en laboratorio de su resistencia a la compresión confinada, de acuerdo con la norma ASTM 7012 “Método de ensayo normalizado para la resistencia en compresión y módulo de elasticidad de especímenes de núcleos de roca intactos bajo estados de esfuerzo y temperatura variables (método C)”. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Resultados del ensayo de compresión confinada de roca

Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	L/D	Masa (g)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MPa)	Contenido de Humedad (%)
0746-2022 #1	51,4	127,0	2,5	655,9	145,5	70,1	2,4
0746-2022#2	51,5	133,8	2,6	703,2	168,9	81,1	2,3

Fuente: (Laboratorio de Geotecnia, 2022)

Adicionalmente, se utilizó el modelo de elevación digital para verificar la orientación preliminar de las principales familias de discontinuidades presentes en el macizo. Los resultados de este análisis se muestran a continuación.

III.1 Modelo de elevación digital

El levantamiento con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio realizado el día 12 de mayo de 2022 por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) del LanammeUCR, permitió la generación de un Modelo de Elevación Digital (MED) por medio de técnicas fotogramétricas. Mediante esta técnica es posible realizar la reconstrucción geométrica de un objeto por medio de fotografías aéreas captadas desde dos puntos de vista diferentes. Lo anterior permite recrear modelos tridimensionales que permiten analizar la forma y características de una superficie del terreno e identificar posibles zonas inestables que serían poco apreciables desde el terreno cuando se realiza un levantamiento en campo.

Es importante mencionar que la precisión de los modelos obtenidos depende de una selección adecuada de la altura y el área del vuelo. De tal forma que, a mayor altura, menor resolución y, por ende, menor precisión del modelo. Así, por ejemplo, modelos obtenidos a partir de una altura de vuelo de 30 metros presenta una resolución de pocos centímetros.

Teniendo esto en cuenta a partir de la nube de puntos del levantamiento en cuestión, fue posible obtener un modelo de elevación digital a partir del cual se obtuvieron las dimensiones y pendiente de corte del talud conformado durante la construcción de la carretera, el cual tiene una altura total de 78 m, la altura de la superficie deslizada es de 30 m aproximadamente y de 18 m de ancho aproximadamente.

Además, con ayuda del software CloudCompare v2.12.1, se generó una representación geométrica fiel de las condiciones del sitio (ver Figura 3), a partir del cual se realizó un levantamiento digital de las discontinuidades con ayuda de la herramienta para medición de planos “Compass”. Se selecciona una sección que represente una superficie plana de la nube de puntos, todos los puntos dentro de esa sección son ajustados por mínimos cuadrados y se obtiene la orientación del vector normal como “Dip/ Dip direction”. Con esta herramienta no es posible obtener la orientación de las discontinuidades que no están expuestas como un plano, sin embargo, utilizando la herramienta de medición de la línea de la discontinuidad es posible obtener la orientación “Plunge/Trend”. El resumen de los resultados del levantamiento digital de las discontinuidades mediante la técnica descrita se muestra en la Tabla 3.



Cabe resaltar que existe una relación entre las mediciones “Plunge/Trend” y Dip/ Dip direction según las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Dip} &= 90^\circ - \text{plunge} \\ \text{Dip direction} &= \text{trend} + 90^\circ \end{aligned}$$

Tabla 3 Datos del levantamiento digital de discontinuidades

Levantamiento CloudCompare				
Familia	Dip	Dip.Dir	Plunge	Trend
J1	-	-	43	164
J1	-	-	42	164
J1	-	-	50	173
J2	41	47	-	-
J2	37	53	-	-
J2	33	33	-	-
J2	38	43	-	-
J3	80	121	-	-
J3	83	122	-	-
J4	-	-	77	57
J4	-	-	78	75
J4	-	-	68	99
J4	-	-	71	98
TALUD	73	112	-	-



Figura 3 Procesamiento de la nube de puntos con CloudCompare v2.12.1

IV. Caracterización y clasificación del talud de roca

Para la clasificación del talud del macizo rocoso, se utilizaron las siguientes tres metodologías aplicables, que son ampliamente utilizadas para estos menesteres:



- Rock Mass Rating (RMR)
- Slope Mass Rating (SMR)
- Sistema Q

A continuación, se muestra en detalle el resultado de la clasificación del macizo por estos métodos.

IV.1 Clasificación RMR “Rock Mass Rating”

Este método fue desarrollado por Bieniawski en 1972, permite estimar la calidad del macizo rocoso mediante la cuantificación de parámetros medidos en campo tales como:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca
- RQD “Rock quality designation”
- Condiciones de las discontinuidades
- Condición del agua en el macizo
- Orientación de las discontinuidades

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 1 de la sección III del presente informe, se procedió a la determinación del valor RMR del talud de roca km 46+200, el cual es requerido para establecer propiedades mecánicas necesarias para realizar el análisis cinemático. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Es importante mencionar que como no se cuenta con la recuperación de testigos de sondeos, el valor del RQD se estima con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Si } J_v > 4,5 & \quad RQD = 115 - 3,3 J_v \\ \text{Si } J_v \leq 4,5 & \quad RQD = 100 \end{aligned}$$

El valor J_v es el número de juntas identificadas por m^2 de macizo rocoso, que en este caso se identificaron aproximadamente 18, resultando en un $RQD=55,6\%$.

Tabla 4 Determinación del RMR del talud de roca km 46+200

Parámetros de clasificación	Clasificación	Puntuación
1. Resistencia de la matriz rocosa (MPa)		
50-100	2-4	7
2. Índice RQD de la roca		
RQD (%)	50 - 75%	13
3.Espaciamiento de las discontinuidades		
Espaciamiento (mm)	0,6 - 2m	15
4.Estado de las discontinuidades		
Persistencia	3-10 m	2
Abertura	1 - 5 mm	1
Rugosidad	Rugosa	5
Relleno	Relleno > 5 mm	2
Grado de meteorización	Ligeramente meteorizada	5



Parámetros de clasificación	Clasificación	Puntuación
5. Agua subterránea		
Condición general	Mojado	7
6. Corrección por discontinuidades		
Taludes	Regular	-25
	RMR	32

De acuerdo con Bieniawski, si se obtiene un puntaje de entre 21 y 40 puntos, la calidad de la roca se clasifica como “mala” con clase IV. Como se indicó anteriormente, el valor RMR del macizo rocoso permite estimar algunas propiedades geomecánicas de la roca, las cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Estimación de parámetros de resistencia de la roca a partir del RMR

$E_M = 10^{\frac{RMR-20}{40}}$	RMR < 50	3
$c = 5 \times RMR$	KPa	160
$\phi = 5 + \frac{RMR}{2}$	°	21

IV.2 Clasificación SMR “Slope Mass Rating”

Esta clasificación es una adaptación del RMR a taludes específicamente, mediante la aplicación de factores de corrección. Primero se debe obtener el valor del RMR básico (RMR_b), luego el factor de ajuste por orientación de discontinuidades se sustituye por el ajuste indicado en el sistema SMR de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

- F₁: Depende de que tan paralelas se encuentren las juntas a la cara del talud

$$F_1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))^2 = 0,81$$
- F₂: Depende del buzamiento de la discontinuidad y su resistencia a una falla planar dada la orientación.

$$F_2 = 1 \text{ para juntas con buzamineto } > 45^\circ$$
- F₃: Refleja la relación entre el buzamiento de la discontinuidad y el del talud. Como β_j-β_s está entre 10° y 0° y β_j+β_s resulta >120° entonces:

$$F_3 = -25$$
- F₄: Corresponde al valor de ajuste según el método de excavación. En este caso al ser un talud precortado

$$F_4 = 10$$

En la Tabla 6 se muestra el proceso de selección de factores de corrección del RMR_{básico} según las recomendaciones de Romana, 1985.

Tabla 6 Factores del SMR del talud de roca km 46+200

Tipo de falla		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable
Planar	$ \alpha_j - \alpha_s $					
Volcamiento	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	$>30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 15^\circ$	$<5^\circ$
Cuña	$ \alpha_i - \alpha_s $					
F ₁		0,15	0,4	0,7	0,85	1
Planar/cuña	$ \beta_j $ o $ \beta_i $	$<20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$>45^\circ$
Volcamiento	F ₂	0,15	0,4	0,7	0,85	1
Planar	$\beta_j - \beta_s$	$>10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$<10^\circ$
Cuña	$\beta_i - \beta_s$					
Volcamiento	$\beta_j + \beta_s$	$<100^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$>120^\circ$	--	--
F ₃		0	-6	-25	-50	-60
Método	Talud Natural	Pre-Cortado	Voladura Suave	Voladura o Mecánico	Voladura Deficiente	
F ₄	15	10	8	0	-8	

Nota:

P: Falla Planar

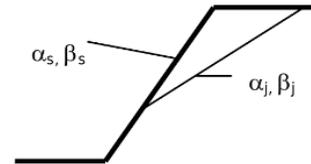
T: Falla por volcamiento

α_s : Dirección de buzamiento del talud

β_s : Buzamiento del talud

α_j : Dirección de buzamiento de la discontinuidad

β_j : Buzamiento de la discontinuidad



Finalmente se obtiene un valor de SMR= 46, con lo cual se califica el talud como clase III. Esto implica que la roca es de calidad "Normal", la estabilidad es "parcialmente inestable", y se recomienda sostenimientos sistemáticos para control de caída de bloques, la clasificación del método SMR se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Clasificación SMR del talud de roca km 46+200

Nº. Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Completamente inestable	Inestable	Parcialmente Estable	Estable	Completamente Estable
Fallas	Gran falla planar o tipo suelo	Planar o grandes cuñas	Algunas planares o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Soporte	Re-excavación	Importante/Correctivo	Sistemático	Ocasional	Ninguno

IV.3 Sistema de clasificación Q

Para este sistema de clasificación se siguieron los siguientes pasos:

- Índice de calidad de la roca (RQD)

Como se mencionó anteriormente, el macizo rocoso posee un RQD de 55,6%



- Número de familias de discontinuidades:
Se midieron cuatro sistemas de discontinuidades. Esto representa una valoración de $J_n=15$.
- Rugosidad de las discontinuidades:
De acuerdo con los parámetros de rugosidad con la metodología de medición de Barton Bandis, el JRC las discontinuidades se clasifican como rugosas, esto representa una valoración de $J_r=1,5$.
- Grado de alteración de las discontinuidades
Existe contacto entre las paredes de roca. Las discontinuidades se caracterizan por presentar capas limosas o arcillo arenosa y pequeñas fracciones de arcilla (no ablandable). Esto corresponde con una valoración de $J_a=3$.
- Factor de reducción por agua en las juntas:
El macizo rocoso presenta flujo de agua constante en las juntas y zonas humedecidas con rastros de musgo por humedad prolongada, por lo tanto, su valoración es de $J_w=0,66$.
- Factor de reducción por esfuerzos:
La valoración de este factor es de $SRF=2,5$, debido a los esfuerzos en la roca, se consideran esfuerzos bajos cerca de la superficie $\sigma_c/\sigma_1 < 200$.

Sustituyendo los valores en la ecuación para la determinación del Q:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

$$Q = \frac{55,6}{15} \times \frac{1,5}{3} \times \frac{0,66}{2,5} = 2,2$$

Bieniawski propone una ecuación que se correlaciona el valor de Q con el valor teórico que se obtendría utilizando el sistema RMR. De esta forma se tiene que $RMR = 9 \ln(Q) + 44$, obteniéndose un valor de $RMR = 51,1$, y luego de aplicar los ajustes por orientación de las discontinuidades, el valor final de RMR se encuentra cercano a 26,1, correspondiendo este resultado con un macizo de categoría IV cuyas características se mencionaron en la Tabla 7. Esto concuerda con la calificación obtenida de manera directa con la metodología RMR.

V. Análisis cinemático

Para realizar el análisis cinemático, primero se realiza un análisis de proyección estereográfica con el cual se obtiene una determinación preliminar de la condición estructural del macizo rocoso, para luego realizar el cálculo correspondiente mediante análisis con el modelo de equilibrio límite (MEL) y obtener los factores de seguridad que podrían presentarse según las condiciones preliminares establecidas.

V.1 Proyección estereográfica

A partir de la orientación de las familias de discontinuidades que afloran en el talud levantadas tanto en campo como con el trabajo en escritorio descrito en el apartado III.1, se realizaron las respectivas representaciones geométricas en dos dimensiones siguiendo la metodología de proyección estereográfica con ayuda de la herramienta Dips 8.0 de RocScience. Cabe resaltar que la proyección estereográfica conserva las relaciones angulares entre líneas y planos, pero no conserva las relaciones espaciales, por lo que no da información sobre la posición o el tamaño de lo que se representa. Con el resultado obtenido de una proyección estereográfica, es posible analizar las intersecciones entre familias de discontinuidades y la pendiente del talud y a partir de esto determinar la probabilidad de ocurrencia de una o varias de las tipologías de falla en taludes en macizos rocosos (planar, cuña, volcamiento).



A partir del levantamiento en campo y con el ángulo de fricción estimado a partir del RMR, se obtuvieron las representaciones mostradas en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6. Al analizar los resultados, se presume que lo que en campo fue identificado como la familia J1, puede representar tres familias independientes, para determinar con mayor precisión si se trata de una o más familias de discontinuidades se recomienda realizar una campaña de levantamiento geológico – geotécnico de las discontinuidades más exhaustivo, para que con una mayor densidad de datos se puede correlacionar por la concentración de los datos de las orientaciones de las familias de discontinuidades y determinar con mayor precisión cada una de las familias de discontinuidades que interactúan en el talud.

Además, se tiene que, la falla por cuña es la que tiene una mayor probabilidad de ocurrencia. Este tipo de inestabilidad ocurre cuando una masa rocosa se desliza respecto al resto del macizo a través de al menos dos planos de discontinuidad, de forma que la intersección resultante buza hacia el exterior del talud y en todo momento existe un contacto entre la masa deslizante y el macizo rocoso.

Esta situación concuerda con la evidencia observada en campo, de acuerdo con la Figura 2 y la clasificación de las diferentes familias de discontinuidades, se presume que la familia J3 interseca las familias J1 y J2, que a su vez estas últimas son el plano sobre el que se desliza la masa rocosa, ya que buzan hacia el exterior del talud.

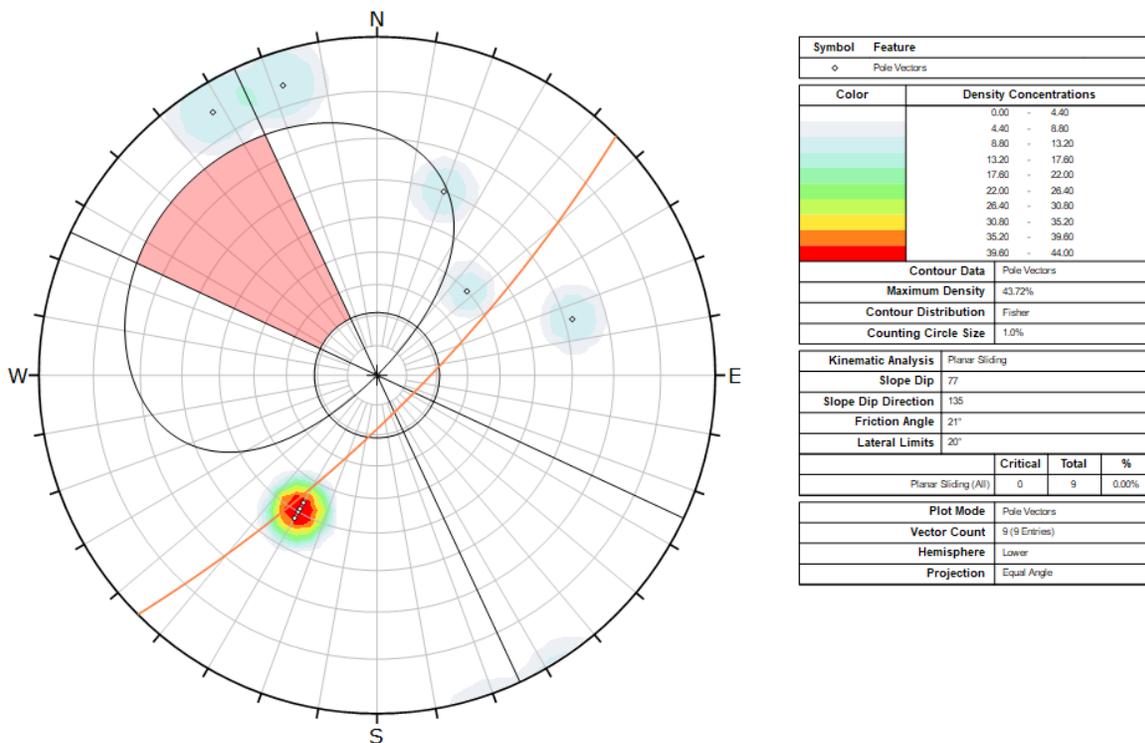


Figura 4. Análisis cinemático por falla planar a partir de levantamiento de discontinuidades en campo

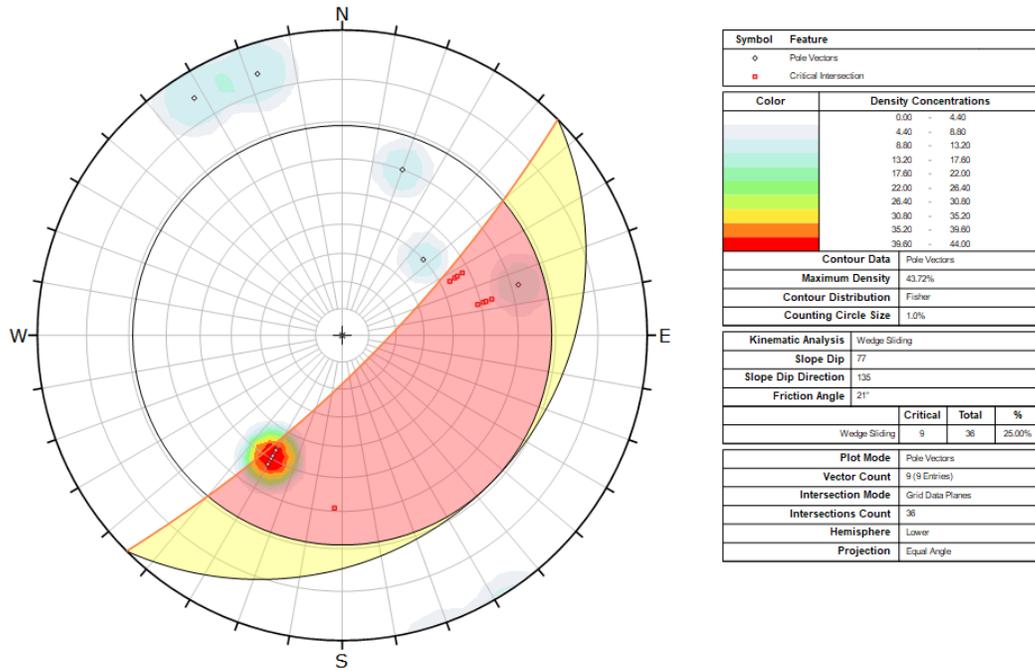


Figura 5. Análisis cinemático por de falla por cuña a partir de levantamiento de discontinuidades en campo

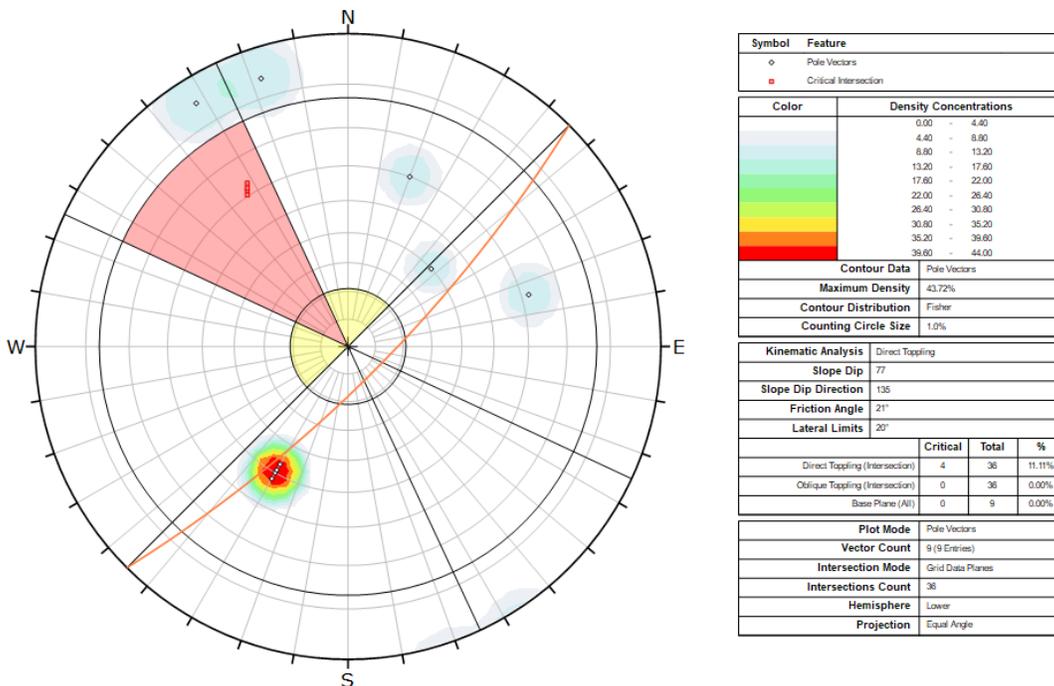


Figura 6. Análisis cinemático por de falla por volcamiento a partir de levantamiento de discontinuidades en campo

Al comparar estos resultados con el levantamiento realizado a partir del modelo de elevación digital mostrado en la Figura 3, se obtiene de manera general resultados congruentes a lo mencionado



anteriormente. Esto se observa en la Figura 7, Figura 8 y Figura 9. Es de esperar que las proyecciones estereográficas no sean exactas entre ambos levantamientos, sin embargo, se espera que de manera general haya una distribución geométrica similar de las familias de discontinuidades en las proyecciones estereográficas, así como concordancia en la probabilidad y tipología de falla.

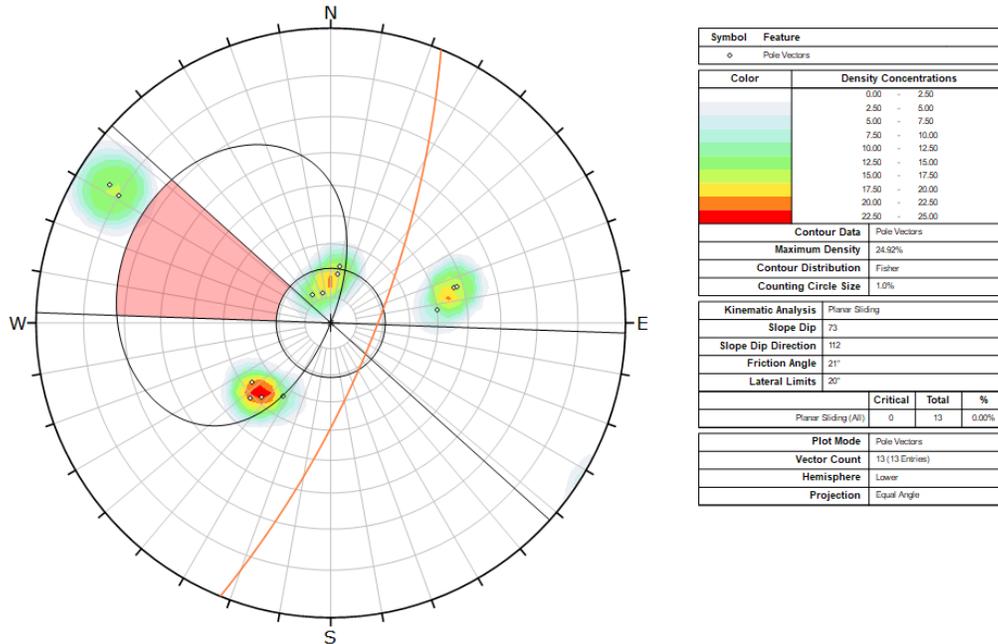


Figura 7. Análisis cinemático por de falla planar a partir de levantamiento de discontinuidades en CloudCompare

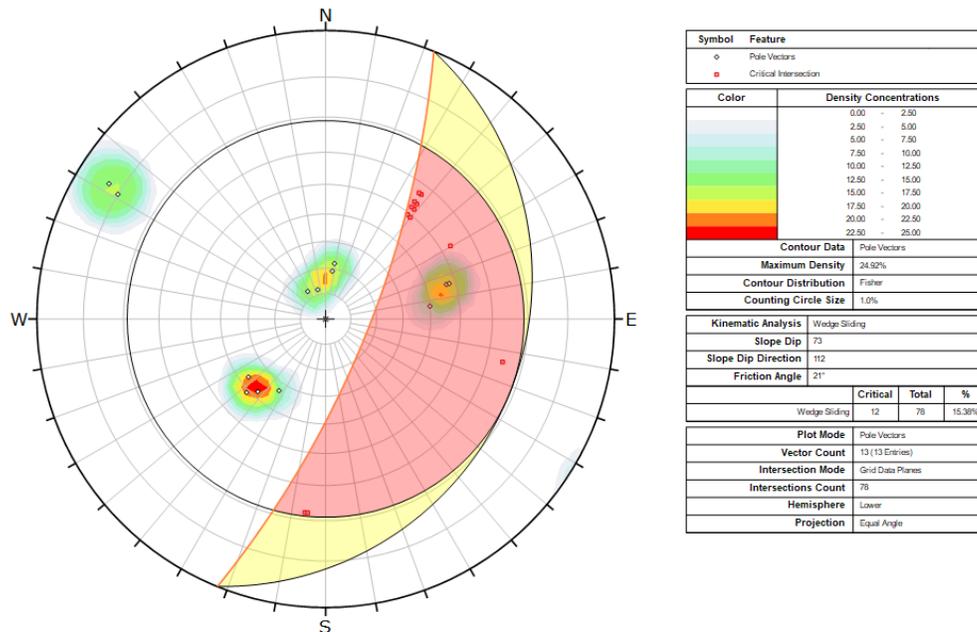


Figura 8. Análisis cinemático por de falla por cuña a partir de levantamiento de discontinuidades en CloudCompare

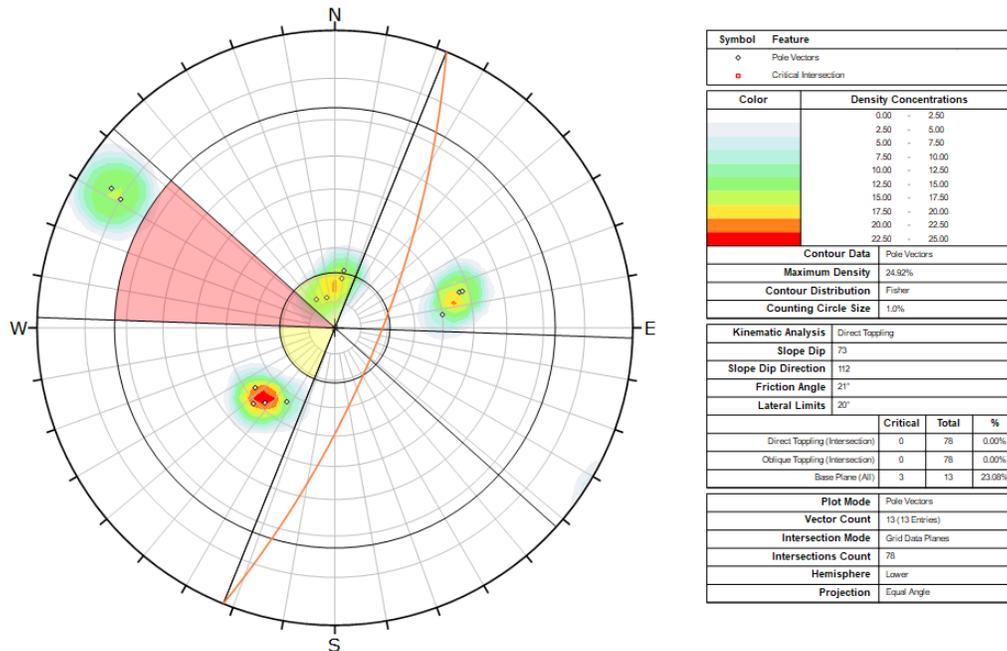


Figura 9. Análisis cinemático por de falla por volcamiento a partir de levantamiento de discontinuidades en CloudCompare

Como se observa en la Figura 6 y Figura 8, dentro de la zona crítica conformada por el cono de fricción debido a la pendiente del talud de corte, es posible identificar puntos de intersección entre diferentes familias de discontinuidades. Por lo anterior y lo observado en campo, se realizó un análisis adicional de las intersecciones entre familias de discontinuidades y su interacción con la zona crítica de falla por cuña. Los resultados se muestran en la Figura 10.

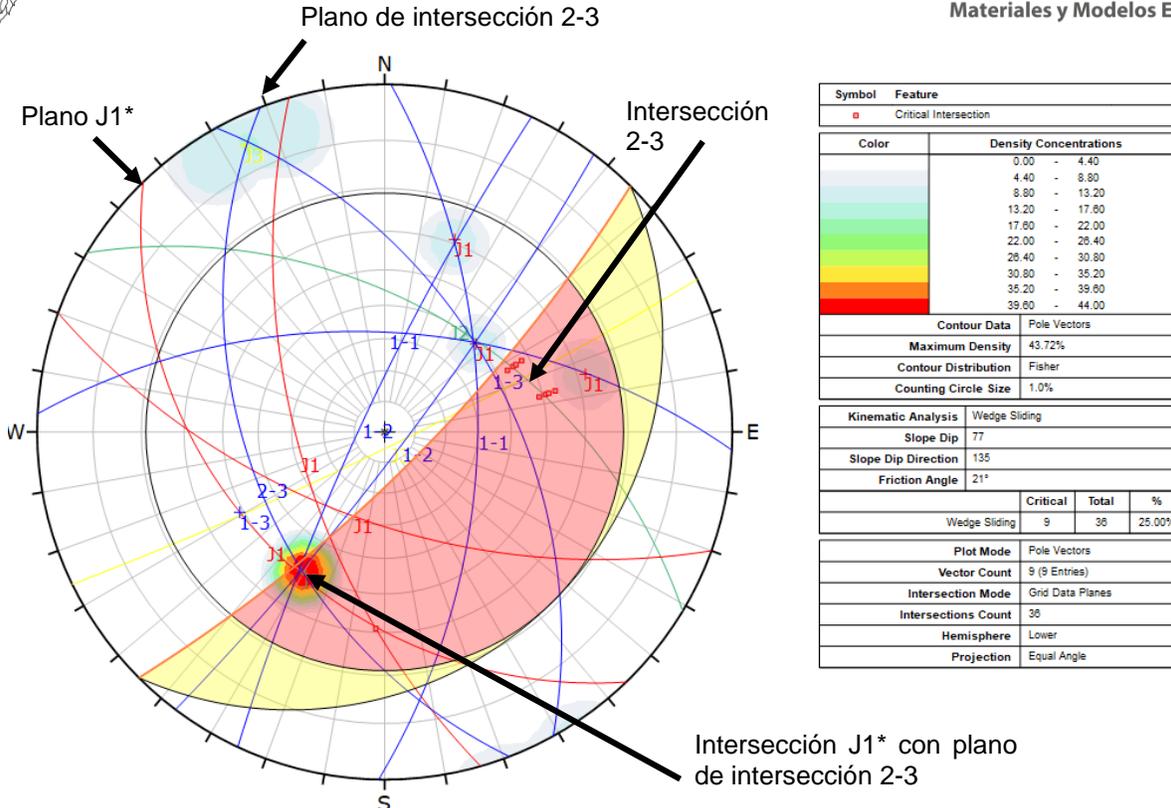


Figura 10. Análisis de intersecciones entre discontinuidades e interacción con zona crítica de falla por cuña

En la Figura 10, se resaltan las intersecciones que se dan entre las familias de discontinuidades identificadas en campo. Se resalta en especial la condición que ocurre al intersecarse la familia identificada como J2 con la familia J3, generando un plano de intersección que a su vez interseca el plano de una de las familias de discontinuidades que fueron representadas por observación y de manera preliminar en campo como J1. Vale la pena aclarar que de acuerdo con la representación estereográfica y por lo comentado en párrafos anteriores, la representación estereográfica de J1 puede conformar diferentes familias, por lo tanto, en la Figura 10 se etiqueta como J1*. Dicha intersección se da dentro de la zona crítica formada por el cono de fricción de la pendiente del talud de corte.

Se presume que esta situación genera una falla por cuña dada la interacción entre tres familias de discontinuidades, que desliza por el plano de ellas, por lo tanto, la visualización en campo de la cuña de falla no resulta tan evidente y requiere de análisis mas profundos para su adecuada caracterización.

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente, se presume que la probabilidad de falla en el talud analizado corresponde con la tipología de falla por cuña, lo cual como se mencionó anteriormente concuerda con el análisis de las condiciones observadas en campo.

V.2 Determinación de factores de seguridad

A partir de los resultados del análisis cinemático de las familias de discontinuidades, se realizó un análisis con el método de equilibrio límite para determinar en la condición actual del talud el factor de seguridad ante una probable ocurrencia de una nueva falla. Para esto se utilizó la herramienta SWedge 7.0 de RocScience, con la cual es posible evaluar la geometría y estabilidad de un talud en macizos rocosos.



De acuerdo con los resultados del ensayo de compresión inconfiada (ver Tabla 2), se estima un peso unitario de la roca de $0,024 \text{ MN/m}^3$. Según lo observado en sitio y la información de entrada del software SWedge 7.0, se identifica agua por debajo de la superficie deslizada que abarca un 80% del talud.

De acuerdo con el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR), para el sitio ubicado en la zona sísmica denominada IV con un perfil de suelo S1 es decir un perfil de roca, los coeficientes pseudoestáticos horizontales a utilizar son:

- 0,15 g para un período de retorno de 150 años
- 0,20 g para un período de retorno de 475 años

En la Figura 11, Figura 12 y Figura 13, se muestran los resultados obtenidos para el análisis de estabilidad con el método de equilibrio límite. De acuerdo con el CGTLCR, una carretera de tránsito alto se clasifica como alto riesgo de pérdida de vidas humanas y alto nivel de riesgo contra daños económicos y ambientales. Bajo esta clasificación el FS debe ser $\geq 1,50$ para la condición estática y $\geq 1,10$ para la condición pseudoestática.

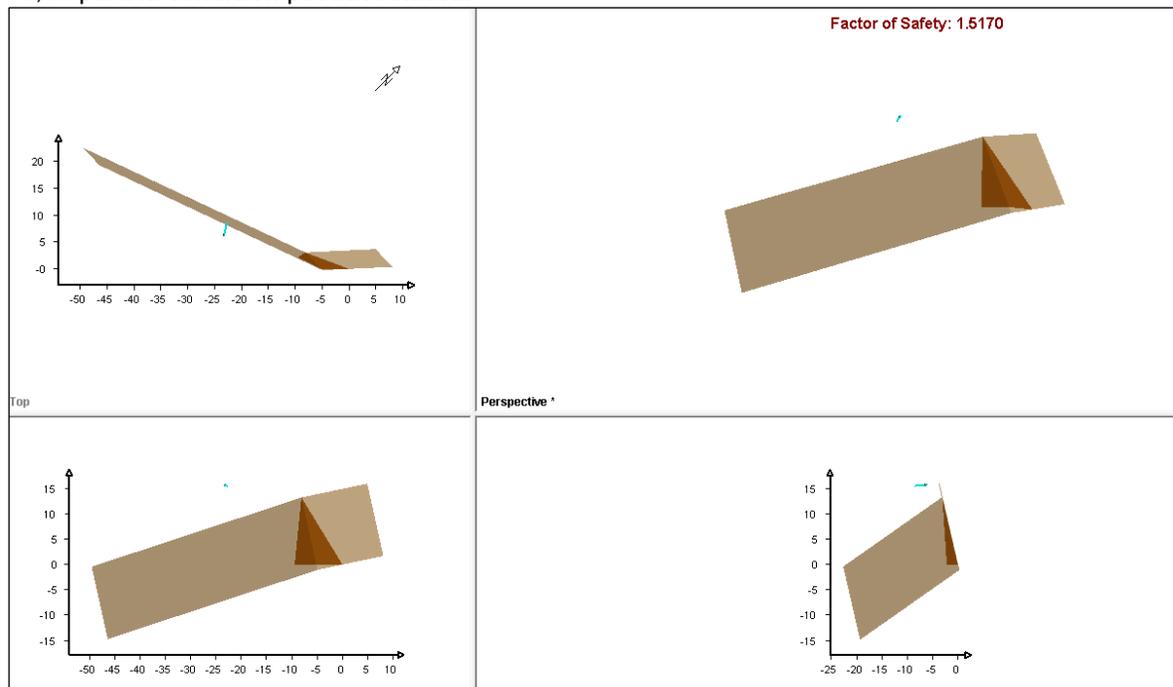


Figura 11. Factor de seguridad para la condición estática con 80% de agua bajo la superficie deslizada

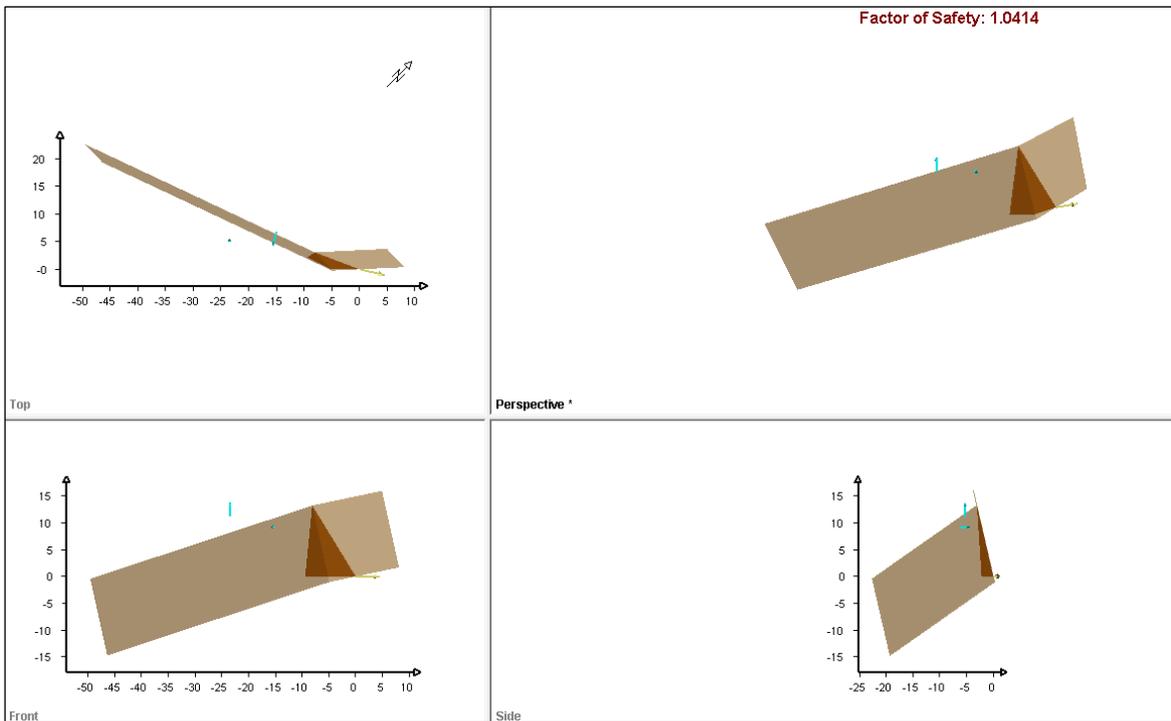


Figura 12. Factor de seguridad para la condición pseudo estática con $a=0.15$ g, con 80% de agua bajo la superficie deslizada

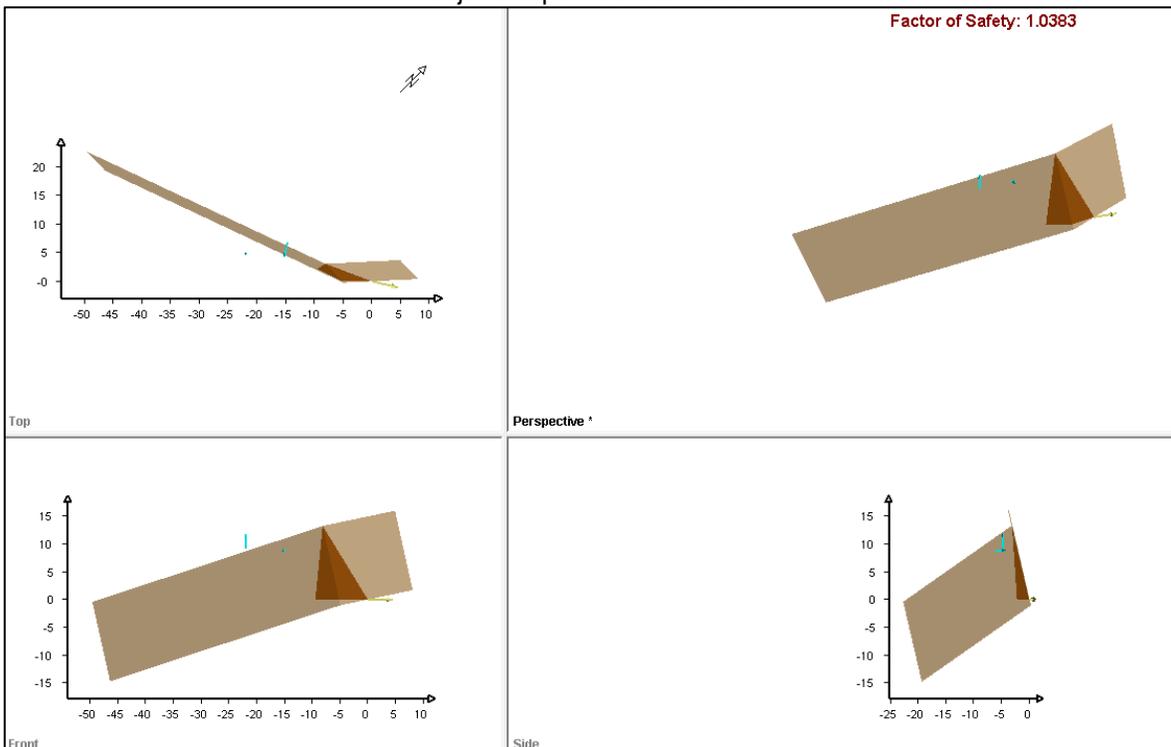


Figura 13. Factor de seguridad para la condición pseudo estática con $a=0.20$ g, con 80% de agua bajo la superficie deslizada



De esta manera los valores de los FS obtenidos se muestran en la Tabla 8. A partir de los análisis realizados con el Método Equilibrio Limite (MEL), el talud cumple el valor mínimo recomendado por el GTLCR para la condición estática, sin embargo, se encuentra en una condición límite. En el caso de los análisis con aceleración sísmica, el talud no cumple con el FS recomendado en el CGTLCR, sin embargo, dado a que el factor de seguridad es mayor que la unidad, se presume se encuentra en equilibrio cercano al límite.

Tabla 8 Resumen de resultados de análisis de estabilidad por el MEL.

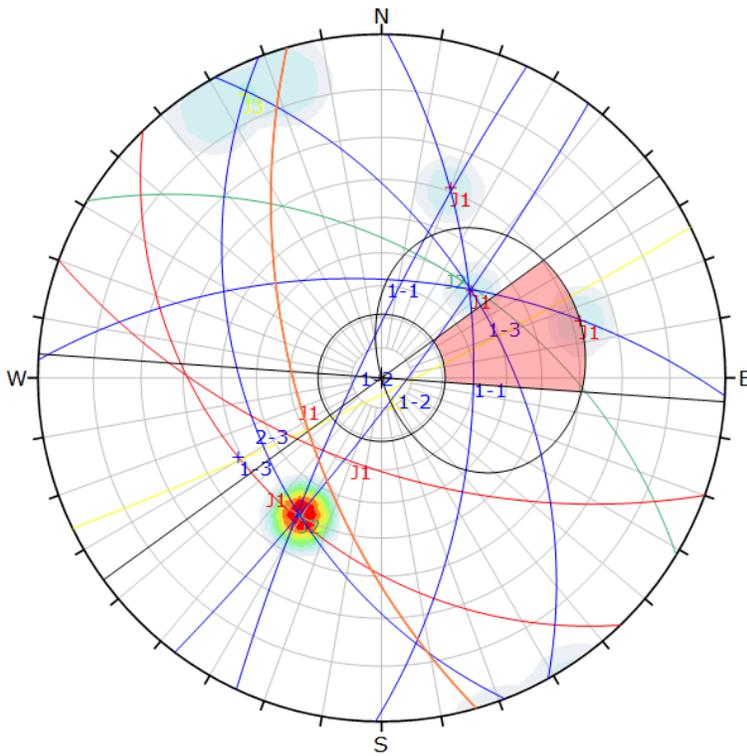
Condición	Factor de Seguridad	Recomendación CGTLCR	Cumplimiento
Estática	1,517	$\geq 1,5$	Si
Pseudo estática 0,15 g	1,041	$\geq 1,10$	No
Pseudo estática 0,20 g	1,038	$\geq 1,10$	No

VI. Condición actual del talud

Dado el análisis realizado en la sección V y considerando que luego del evento sucedido el día 10 de mayo de 2022 en el talud ubicado en la margen izquierda del km 46+200 de la RN 27 en dirección San José Caldera se vio modificado en su geometría, dejando expuesto un plano que representa la orientación de una familia de discontinuidades, se realiza un análisis adicional con estas características.

De manera preliminar y con el objetivo de hacer el análisis cinemático para la nueva condición de pendiente del talud, basándose en las condiciones de campo y la clasificación de las familias de discontinuidades, se presume que el plano expuesto tiene una orientación similar a la familia etiquetada como J1.

En las Figura 14Figura 15Figura 16 se muestran las proyecciones estereográficas representativas de la condición actual del talud para cada tipología de falla, con las cuales se presume que el talud se encuentra en una condición más vulnerable ante una posible ocurrencia de falla.



Color	Density Concentrations
0.00	- 4.40
4.40	- 8.80
8.80	- 13.20
13.20	- 17.60
17.60	- 22.00
22.00	- 26.40
26.40	- 30.80
30.80	- 35.20
35.20	- 39.60
39.60	- 44.00

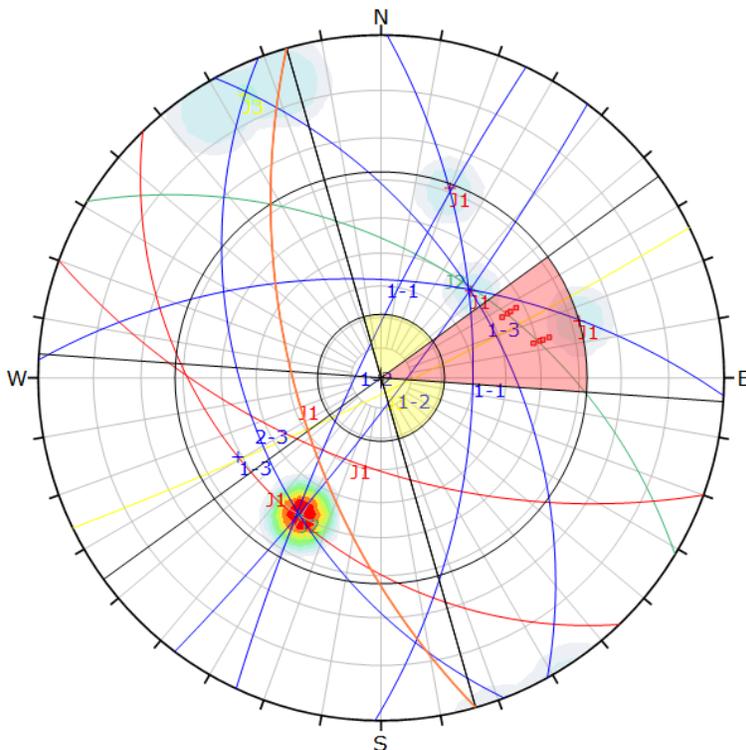
Contour Data		Pole Vectors	
Maximum Density	43.72%		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		

Kinematic Analysis		Planar Sliding	
Slope Dip	62		
Slope Dip Direction	254		
Friction Angle	21°		
Lateral Limits	20°		

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	1	9	11.11%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	9 (9 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 14. Análisis cinemático de falla planar para la condición actual del sitio



Symbol	Feature
•	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
0.00	- 4.40
4.40	- 8.80
8.80	- 13.20
13.20	- 17.60
17.60	- 22.00
22.00	- 26.40
26.40	- 30.80
30.80	- 35.20
35.20	- 39.60
39.60	- 44.00

Contour Data		Pole Vectors	
Maximum Density	43.72%		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		

Kinematic Analysis		Direct Toppling	
Slope Dip	62		
Slope Dip Direction	254		
Friction Angle	21°		
Lateral Limits	20°		

	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	8	36	22.22%
Oblique Toppling (Intersection)	0	36	0.00%
Base Plane (All)	1	9	11.11%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	9 (9 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	36
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 15 Análisis cinemático de falla por volcamiento para la condición actual del sitio

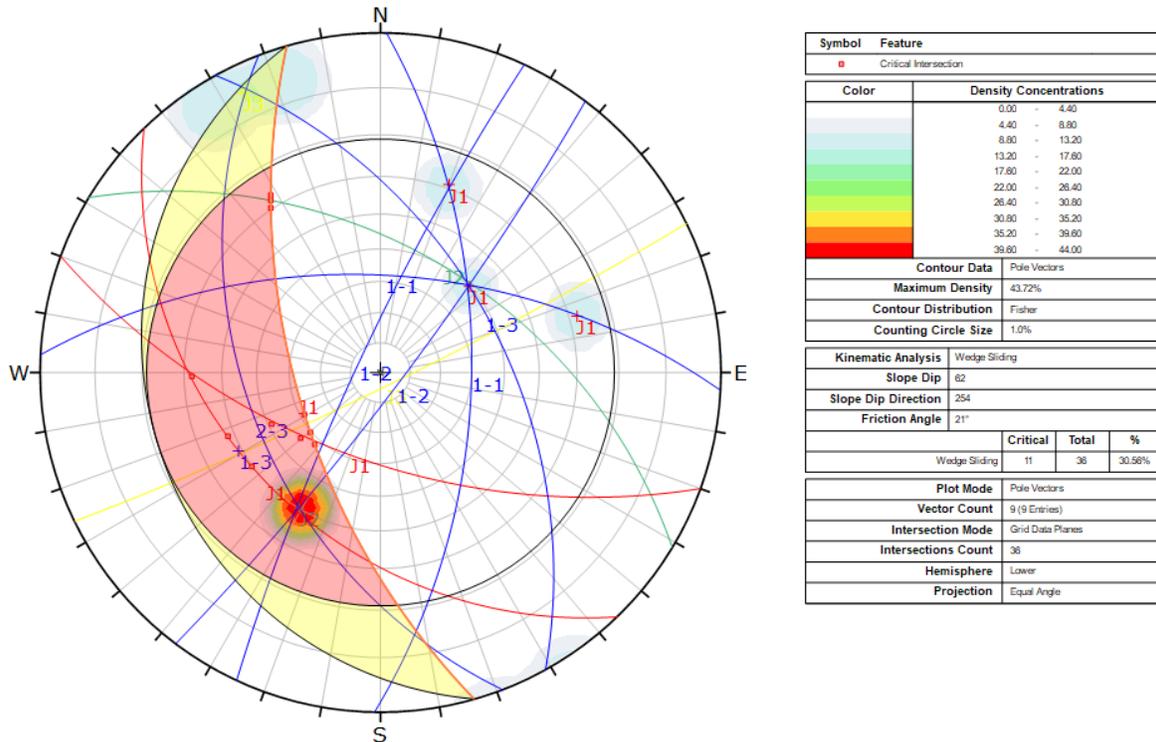


Figura 16 Análisis cinemático de falla por cuña para la condición actual del sitio

Como se observa en las figuras se considera prestar especial atención a la falla tipo cuña, ya que como se observa en la proyección de la Figura 16, dentro de la zona crítica formada por el cono de fricción producto de la geometría del talud, se identifica la interacción de todas las familias de discontinuidades ya sea de manera individual o por el plano de intersección entre 2 de ellas.

Dado que estos análisis responden a una campaña de investigación preliminar, con limitaciones en cuanto a la recolección de datos, los resultados obtenidos no son definitivos ni sustituyen los criterios mínimos para el diseño de una adecuada propuesta de estabilización del talud. Sin embargo, esta información puede ser considerada como una base para una estimación preliminar de la condición del sitio y posible ocurrencia de falla, y además resalta la importancia de realizar un análisis más profundo que incluya una campaña de exploración geológico – geotécnico exhaustiva, pues la precisión de los resultados obtenidos en estos análisis depende directamente de una caracterización profunda de las discontinuidades que conforman macizo rocoso.

VII. Comentarios finales

Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos del análisis de estabilidad y probabilidad de falla que podrían presentarse en el talud ubicado en el km 46+200 de la Ruta Nacional No.27, ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, es responsabilidad del encargado del mantenimiento del proyecto de acuerdo con lo concretado en los términos de la concesión. Sin embargo, el presente informe puede constituir un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis de estabilidad más exhaustivos para evaluar las afectaciones que puede sufrir la carretera y su óptimo desempeño.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados, los resultados de los factores de seguridad no son favorables ya que no



cumplen con los requisitos de estabilidad en condición pseudo estática definidos por el CGTLCR, a pesar de que el talud en la condición pseudoestática se encuentra en equilibrio cercano al límite.

No obstante, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales incluyendo más ensayos de laboratorio y en sitio, aunado a evaluar otros escenarios como la incorporación del nivel freático medido directamente de las condiciones de sitio, y la inclusión de distintos elementos de refuerzo para la optimización de los resultados que se puedan obtener. La omisión de estos análisis podría significar problemas económicos por posibles fallas en el talud que impliquen cierres parciales o totales de la vía y por lo tanto una disminución de su funcionamiento óptimo.

Adicionalmente, se resalta que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial, así como protección de la carretera contra caída de bloques. Por lo que se recomienda implementar medidas integrales de mitigación que contemplen estos dos aspectos.



VIII. Referencias

1. Asociación Costarricense de Geotecnia. (2016). *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica*. Cartago: Costa Rica.
2. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cuarta Edición.
3. El Observador. (10 de 05 de 2022). *observadorcr*. Obtenido de <https://observador.cr/derrumbe-obliga-a-cierre-total-en-ruta-27-conductores-deberan-usar-rutas-alternas/>
4. Laboratorio de Geotecnia. (2022). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0690-2022*. San Pedro: LanammeUCR.
5. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) . (2015). *Estudio de presencia de drenaje ácido de rocas (DAR) en taludes de la Ruta Nacional 27*. San Pedro, Costa Rica: Lanamme UCR.



IX. Control de cambios

Fecha	Página	Descripción del cambio	Versión inicial	Versión final
17/06/2022	14	Corrección al título de la figura 5	Análisis cinemático de falla por volcamiento a partir de levantamiento de discontinuidades en campo	Análisis cinemático de falla por cuña a partir de levantamiento de discontinuidades en campo
17/06/2022	14	Corrección al título de la figura 6	Análisis cinemático de falla por cuña a partir de levantamiento de discontinuidades en campo	Análisis cinemático de falla por volcamiento a partir de levantamiento de discontinuidades en campo