



## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-1628-2022

### Informe de evaluación del talud de aproximación al puente sobre Ruta Nacional 27 en la Ruta Nacional 707



Preparado por:

Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, DSc.  
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica  
Noviembre, 2022





<b>1. Informe</b> EIC-Lanamme-INF-1628-2022		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Informe de evaluación del talud de aproximación al puente sobre Ruta Nacional 27 en la Ruta Nacional 707		<b>4. Fecha del Informe</b> 21/11/2022
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b> <i>Debido a la solicitud de la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del LanammeUCR, se presenta a continuación el resultado de los análisis de estabilidad de los taludes próximos ubicados en el lado oeste, sector sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707, con la finalidad de verificar la necesidad de intervención de estos taludes dada la proximidad y posibles afectaciones a dicho puente. A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones de la condición actual se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados y las condiciones evaluadas, los resultados de los factores de seguridad fueron favorables y que cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR. No obstante, las simulaciones ejecutadas donde se realizaron estimaciones de las condiciones originales de la zona de estudio (es decir, antes de que se presentaran problemas de estabilidad) confirmaron que el relleno del talud ubicado en el lado oeste del sector sur del puente presentó factores de seguridad inferiores a las recomendaciones del CGTLCR. Los análisis se realizaron con el Método de Equilibrio Límite (MEL), por lo que se debe tener en consideración que este enfoque ignora el comportamiento de esfuerzo-deformación, el cual se considera importante ejecutar para conocer las deformaciones en el bastión del puente. Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, deben ser asignados a un profesional en geotecnia responsable del análisis y propuestas de implementación de obras de estabilidad de taludes. Sin embargo, constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que puede sufrir la estructura de pavimento y el puente. Finalmente, se resalta que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Modelo de elevación digital, método de equilibrio límite, análisis de estabilidad, factor de seguridad.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> -	<b>10. Núm. de páginas</b> 19
<b>11. Preparado por:</b>  Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc. Ingeniero PIG Fecha: 21 / 11 / 2022		
<b>12. Revisado y aprobado por:</b>  Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc Coordinadora del Programa de Ingeniería Geotécnica Fecha: 21 / 11 / 2022		



## Contenido

I. Introducción.....	4
II. Descripción del sitio .....	4
II.1 Aspectos generales.....	4
II.2 Condición actual.....	5
III. Levantamiento en campo .....	6
III.1 Modelo de elevación digital (MED) .....	6
III.2 Caracterización y clasificación del macizo rocoso .....	9
IV. Comprobación de estabilidad de los taludes.....	12
IV.1 Resultado de estabilidad de la condición actual utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL).....	12
IV.2 Resultado de estabilidad de una estimación de la condición inicial utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL).....	15
V. Comentarios finales.....	18
VI. Referencias .....	19

# Informe de evaluación del talud de aproximación al puente sobre Ruta Nacional 27 en la Ruta Nacional 707

## I. Introducción

Debido a la solicitud de la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del LanammeUCR el presente informe muestra los resultados de los análisis de estabilidad de la superficie de los taludes próximos ubicados en el lado oeste, sector sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707. Estos análisis tienen la finalidad de verificar la necesidad de intervención de estos taludes dada la proximidad y posibles afectaciones a dicho puente.

La solicitud responde a las inestabilidades observadas en el relleno de aproximación a la estructura del puente, observándose caída de material, agrietamiento del terreno y modificaciones en la señalización de la vía.

## II. Descripción del sitio

### II.1 Aspectos generales

El sitio de análisis se ubica en el distrito de Escobal, cantón de Atenas, provincia de Alajuela en el sector sur del puente sobre la ruta nacional 27 en la ruta nacional 707, aproximadamente en el kilómetro 44+300 de la ruta nacional 27, entre las quebradas Cedro y Nance, tal y como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Ubicación espacial del sitio de estudio

Según Ruiz *et al.* (2015) el área de estudio presenta una geomorfología montañosa con laderas denudacionales de origen volcánico con pendientes altas, moderadas y bajas con ángulos que varían entre 8° y 35°. Las pendientes más altas favorecen procesos de deslizamientos intensos y también son susceptibles a la erosión de suelos. En las zonas donde ocurren deslizamientos se presentan dificultades para que crezca nuevamente una cobertura vegetal debido a los aumentos de pendiente, con lo cual las superficies quedan descubiertas y propensas a la escorrentía.

En general, esta área pertenece a la formación Grifo Alto, que se caracteriza por la presencia de brechas volcánicas y coladas de lava masivas. De la caracterización de los materiales realizada por Ruiz *et al.* (2015) los materiales presentes corresponden a **andesitas**, cuya descripción microscópica corresponde a una textura holocristalina porfirítica, matriz (60%), pilotaxítica compuesta de microlitos de plagioclasa como único mineral reconocible, fenocristales (25%), plagioclasa (25%) hipidiomórficos con zonación continua, minerales de alteración (14%): calcita (sustituyendo las plagioclasas en un 15%), pirita (5%), hematita (3%), clorita verde (4%) y ceolita (2%), minerales accesorios (>1%), apatito y zircón.

La zona de estudio corresponde con un Bosque Húmedo Tropical (bh-T), según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, con temperaturas superiores a los 24°C la mayor parte del año. De acuerdo con datos del Instituto Meteorológico Nacional, la zona se caracteriza por precipitaciones promedios anuales entre 1800-4000 mm. Finalmente, esta región presenta una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por cinco meses, iniciando en diciembre hasta los meses de abril o mayo.

## II.2 Condición actual

Actualmente el sitio se encuentra con vegetación autóctona densa al pie del talud de interés, tal y como se observa en la Figura 2. Cabe resaltar que la vegetación es una limitante para obtener con precisión la topografía y composición geotécnica del talud en cuestión. Sin embargo, se realizó el levantamiento mediante inspección y criterios geotécnicos en campo y con ayuda de equipos tecnológicos para el levantamiento y generación del modelo de elevación digital.



Figura 2. Situación actual del sitio de análisis

Es importante mencionar que, durante las visitas realizadas, se observó que tanto el talud a la derecha e izquierda de la carretera (sentido ruta nacional 27 – Turrubares) carecen de sistemas para el control de escorrentía superficial (ver Figura 3), lo cual no permite la adecuada evacuación de las aguas provenientes de la lluvia, pudiendo eventualmente desencadenar problemas de erosión en los taludes y agravar la situación de estabilidad de los mismos, especialmente en el talud derecho de la carretera, que ya presenta evidencias de problemas de estabilidad (ver Figura 3a).

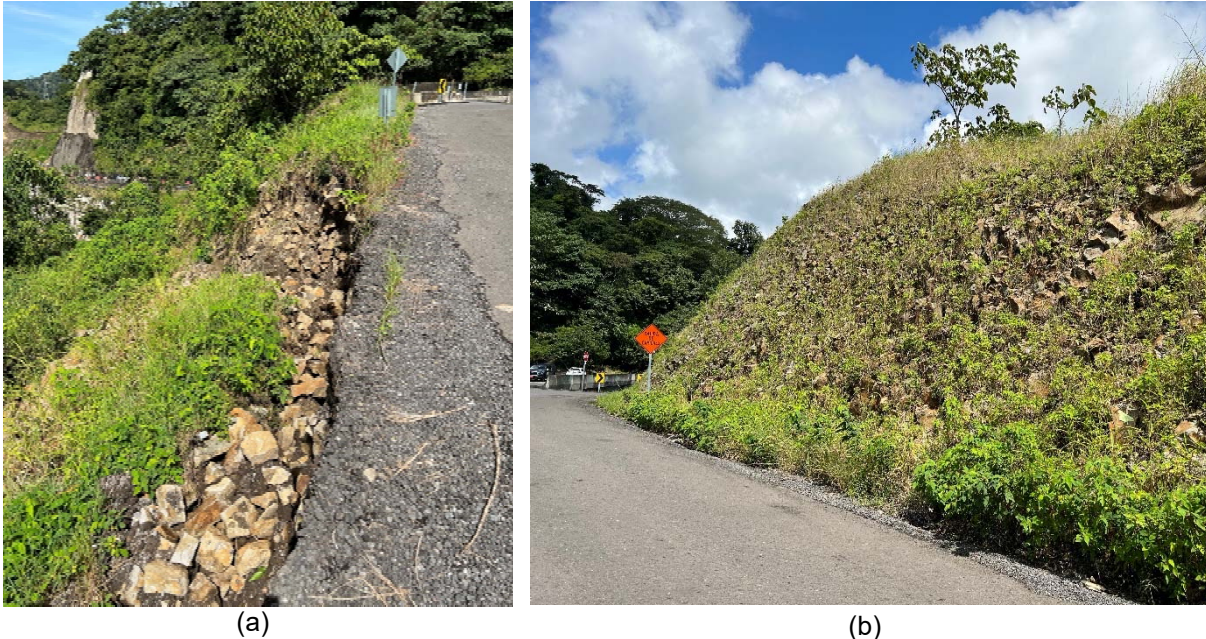


Figura 1. Ausencia de sistemas para el control de la escorrentía superficial (a) talud derecho (b) talud izquierdo, sentido ruta nacional 27 – Turrubares

De esta manera, se sugiere implementar las medidas correspondientes para la construcción de sistemas adecuados de manejo de aguas de escorrentía superficial. Es recomendable incluir también las actividades de limpieza y mejoras de estas medidas complementarias a las de estabilización que se realicen para el control de la erosión superficial, especialmente, en lo que se refiere al talud derecho, con la finalidad de mantener la estabilidad de los taludes con una pendiente estable.

### III. Levantamiento en campo

Teniendo en consideración solicitud realizada por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del LanammeUCR y la situación actual del sitio, donde se destaca la evidencia de inestabilidad de taludes al lado derecho de la carretera (sentido ruta nacional 27 – Turrubares) y la posible condición de vulnerabilidad en la que se encuentra la subestructura del puente sobre la ruta nacional 27 en la ruta nacional 707, se procedió por parte del Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR a realizar los análisis que se presentan a continuación:

#### III.1 Modelo de elevación digital (MED)

Inicialmente, con la colaboración de la Oficina de Geomática (OGEO) del LanammeUCR, se realizaron levantamientos con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio los días 12 y 14 de octubre de 2022.

Este levantamiento 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 imposibles apreciarlas desde el terreno.

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 50 metros presenta una resolución de pocos centímetros.

Teniendo esto en consideración y con base en el levantamiento realizado por el VANT de la OGEO, fue posible obtener el modelo de elevación que se muestra en la Figura 4. Como se observa en ambas figuras, el levantamiento realizado permitió recrear el terreno para su posterior análisis.



Figura 4. Resultados obtenidos del levantamiento realizado con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio (a) Modelo digital de superficie (b) nube de puntos

Con la ayuda del software QGIS fue posible utilizar el modelo de elevación digital anterior para generar las curvas de nivel representativas de la superficie del terreno, dicho modelo se puede ver representado en la Figura 5, en el cual se han calculado las curvas de nivel en intervalos de 25 cm. Como se puede observar las elevaciones en la zona de estudio varían entre los 301,25 m hasta los 336 m de altura.



Figura 5. Curvas de nivel a cada 25 cm obtenidas a partir del modelo de elevación digital

De la visita realizada en campo el día 12 de octubre, se destacan a continuación dos sectores que evidenciaron problemas de estabilidad. El primer sector (ver Figura 6) corresponde al talud ubicado en el lado oeste del sector sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707. Este sector corresponde al relleno de aproximación del puente, el cual actualmente muestra evidencias de falla o inestabilidad. Según la inspección visual realizada, el material observado corresponde con un material granular. Se observaron algunos restos de materiales que sugieren que el relleno consistía en un muro mecánicamente estabilizado, sin embargo, se desconocen los detalles del diseño geotécnico de esta obra (ver Figura 6). Por su parte, en la visita realizada no fue posible identificar si debajo de este relleno, o en las proximidades de este, se encontraba el mismo afloramiento del macizo rocoso observado en el área de estudio.



Figura 6. Condición actual del relleno de aproximación sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707

El segundo sector (ver Figura 7) corresponde a un talud ubicado al lado derecho de la carretera (sentido ruta nacional 27 – Turrubares), aproximadamente a 50 m al sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707. Ambos sectores, y en general la ruta nacional 707, carecen de sistemas para el control de escorrentía superficial, lo cual puede contribuir de forma negativa en la estabilidad de los taludes.



Figura 7. Condición actual del talud derecho de la carretera (sentido ruta nacional 27 – Turrubares), aproximadamente a 50 m al sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707





### III.2 Caracterización y clasificación del macizo rocoso

Al estar constituida la zona de estudio por taludes en roca, para la clasificación del macizo rocoso se utilizó el método del índice geológico de resistencia, GSI (*geological strength index*), que evalúa la calidad del macizo en función del grado y las características de fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades.

El índice geológico de resistencia, GSI, fue desarrollado por Hoek (1994) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR (*rock mass rating*, desarrollado por Bieniawski en 1972) para evaluar la resistencia de macizos rocosos. De esta manera, Hoek y Brown proponen un criterio generalizado para macizos rocosos fracturados de mala calidad, con materiales blandos y alterados, con base en la ecuación:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$$

donde:

$\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales mayor y menor, respectivamente, en la ruptura

$\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa

$m$ ,  $s$  y  $\alpha$  dependen de las propiedades y características del macizo rocoso y que se definen por las ecuaciones:

$$m = m_i \exp \frac{GSI - 100}{28}$$

donde  $m_i$  es el valor correspondiente a la matriz rocosa, que se obtiene en ensayos de compresión triaxial. La Tabla 1 muestra los valores típicos para diferentes tipos de roca que pueden utilizarse.

Para macizos con  $GSI > 25$  (buena – media calidad):

$$s = \exp \frac{GSI - 100}{9} \quad \alpha = 0,5$$

Para macizos con  $GSI < 25$  (mala – muy mala calidad):

$$s = 0 \quad \alpha = 0,65 - \frac{GSI}{200}$$

El valor de  $GSI=25$  es arbitrario. Para  $GSI > 25$  (macizos de media a muy buena calidad) este índice puede obtenerse a partir del RMR, mediante la correlación siguiente, en cuyo caso debe asignarse un valor de 15 para las condiciones de agua del macizo y un valor de 0 al parámetro de ajuste para la orientación de las discontinuidades:

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

En la aplicación del GSI para utilizarlo dentro del criterio generalizado de Hoek y Brown en la interpretación de los valores de resistencia obtenidos debe tenerse en cuenta que:

- El criterio es válido únicamente para macizos rocosos con comportamiento isotrópico.
- El índice GSI se basa en estimaciones cualitativas y en modelos simples que rara vez coinciden con las condiciones reales.
- Los resultados deben ser cotejados con otros métodos y, siempre que sea posible, con datos de campo y análisis a posteriori (*back analysis*).

Así pues, se recomienda que el valor del GSI deba ser estimado directamente por medio del gráfico que se presenta en la Figura 8.

<p><b>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA ROCAS FRACTURADAS</b> (Hoek y Marinos, 2000)</p> <p>Estimar el valor promedio del GSI para la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No intentar ser muy preciso. Citar un rango de 33 a 37 es más realístico que un GSI de 35. Note que las tablas no se aplican a fracturas estructuralmente controladas. Cuando los planos estructurales débiles están en una orientación desfavorable con respecto de la cara excavada, estas dominarán el comportamiento de todo el macizo rocoso. La resistencia de cizalla de las superficies de la roca son propensas a deteriorarse como el resultado de cambios en el contenido de humedad, se reducirá si hay presencia de agua. Cuando se trabaja con rocas en las categorías de débil a muy débil, se debería hacer un desplazamiento hacia la derecha. La presión del agua es tratada con análisis de esfuerzos efectivos.</p>		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
ESTRUCTURA		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA		
		Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas	Superficies rugosas, ligeramente intemperizadas, con patinas de óxidos de hierro	Superficies lisas, moderadamente intemperizadas y/o alteradas	Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos compactos o fragmentos angulares	Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos arcillosos blandos		
		DECRESE LAS CONDICIONES SUPERFICIALES →						
<p> <b>INTACTA O MASIVA.</b> Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas. Esp. 100cm</p> <p> <b>BLOCOSA.</b> Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades. Esp. 30cm</p> <p> <b>MUY BLOCOSA.</b> Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades. Esp. 10cm</p> <p> <b>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA.</b> Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación o esquistocidad. Esp. 3cm</p> <p> <b>DESINTEGRADA.</b> Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados Esp. 1cm</p> <p> <b>LAMINADA/ CIZALLADA.</b> Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistocidad o planos de cizalla</p>	<p>150</p> <p>80</p> <p>40</p> <p>20</p> <p>5</p> <p>2</p> <p>DISMINUYE LA TRABAZÓN DE LAS PIEZAS DE ROCA ↓</p>	90	80	70	60	N/A	N/A	
		80	70	60	50	40	30	20
		40	30	20	10	N/A	N/A	N/A
		20	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Figura 8. Caracterización de un macizo rocoso fracturado en función de la trabazón del macizo y las condiciones de sus discontinuidades

Tabla 1. Valores de la constante  $m_i$  para roca intacta por tipo de roca

Tamaño del grano	Sedimentaria			Metamórfica		Ígnea		
	Carbonato	Detrítico	Química	Carbonato	Silicato	Félsico	Máfico	Máfico
Grueso	Dolomita 10,1	Conglomerado (20)		Mármol 9,3	Gneis 29,2	Granito 32,7	Gabro 25,8	Norita 21,7
Mediano	Tiza 7,2	Arenisca 18,8	Esquistos 19,3		Anfibolita 31,2		Dolerita (15,2)	
Fino	Caliza 8,4	Limolita 9,6	Yeso 15,5		Cuarcita 23,7	Riolita (20)	Andesita 18,9	Basalto (17)
Muy Fino		Arcilla 3,4	Anhidrita 13,2		Pizarra 11,4			

Nota: los valores mostrados fueron obtenidos a partir de un análisis estadístico de ensayos triaxiales de cada tipo de roca. Los valores entre paréntesis son estimados

De esta manera, a partir de la visita en campo fue posible realizar una evaluación de la condición del macizo rocoso, la cual se muestra en la Figura 9, donde se puede notar una estructura conformada por una gran cantidad de bloques angulares de muchas familias de discontinuidades y con una gran persistencia de los planos de estratificación. Por su parte, las discontinuidades presentan una condición mala, con superficies lisas y cizalladas, intemperizadas con llenos compactos o fragmentos angulares. De forma tal, que se puede estimar un valor promedio del GSI en un rango entre 25 y 35, por lo cual, para efectos de los análisis se empleó un valor de **GSI igual a 30**.



Figura 9. Condición del macizo rocoso observado en las proximidades del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707



Como se mencionó anteriormente, la región donde se encuentra la zona de estudio pertenece a la formación Grifo Alto, donde según Ruiz *et al.* (2015) los materiales presentes corresponden a andesitas, por lo que según lo observado en Tabla 1, corresponde un valor de  $m_i = 18,9$ .

Para tener en consideración el grado de perturbación del macizo debido a los daños por voladura y relación tensional, el criterio generalizado de Hoek y Brown define un parámetro adicional llamado *factor de disturbación*,  $D$ . Este varía desde 0 para macizos rocosos sin disturbación in situ, a 1 para macizos rocosos muy perturbados. Cabe resaltar que el factor  $D$  se aplica solo a la zona dañada por voladuras o con relajación tensional y no debe ser aplicado a todo el macizo rocoso, ya que puede dar lugar a resultados erróneos e innecesariamente pesimistas. Así pues, debido a lo observado en sitio, y como se indicó en la Figura 3a, el macizo rocoso próximo a la zona de estudio presenta un alto grado de perturbación que puede estar asociado a la relajación tensional observada, razón por la cual se estimó utilizar un valor de  $D=1,0$ .

Finalmente, aunque no fue posible recolectar muestras de roca para la determinación en laboratorio de su resistencia a la compresión inconfiada, 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)”. Por lo tanto, se estimó un valor promedio de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, UCS (*uniaxial compressive strength*) a partir de los resultados de ensayos de laboratorio realizados en un punto cercano, localizado en el Km 46+200 de la ruta nacional 27, San José – Caldera el cual pertenece a la misma formación geológica Grifo Alto identificada por Ruiz *et al.* (2015) y cuyos resultados se encuentran en el informe EIC-Lanamme-INF-0740-2022, cuyo valor promedio se estimó en  $UCS = 75600 \text{ kPa}$

#### IV. 0063Comprobación de estabilidad de los taludes

##### IV.1 Resultado de estabilidad de la condición actual utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)

Actualmente la mayoría de los estudios de estabilidad de taludes se basan en los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), donde se considera la relación entre las fuerzas deslizantes y resistivas a lo largo de una superficie de falla dada. Convencionalmente, los análisis de estabilidad se efectúan considerando perfiles bidimensionales, los cuales son una simplificación significativa de la situación real. En estas representaciones bidimensionales, el ingeniero diseñador define con su criterio, las secciones transversales críticas en las cuales se puede presentar una falla o deslizamiento del talud. Sin embargo, debe tenerse en consideración que los MEL poseen limitaciones que deben ser conocidas por el geotecnista con la finalidad de escoger el método que mejor responda a las solicitudes del problema que se quiere evaluar. Así pues, entre las limitaciones generales que tiene el MEL se pueden mencionar:

- No se incluye un análisis de deformaciones
- La base de cálculo considera un equilibrio estático de fuerzas estáticas. Sin embargo, una vez que se genera la falla, el modelo deja de ser aplicable, puesto que la geometría de análisis cambia, y comienza a darse un movimiento de la masa de suelo, con el cual se deja de tener un equilibrio estático
- Se supone una distribución uniforme de esfuerzos en la base de los elementos o dovelas.

Por su parte, dependiendo de los diferentes métodos de equilibrio límite que existen, se pueden encontrar otras limitaciones tales como:

- Se asume que el talud tiene un material isotrópico
- Se puede asumir la existencia, o no, de fuerzas cortantes entre las dovelas
- En algunas metodologías se asume un equilibrio de momentos
- Se asume una superficie de falla.

Cuando se consideran las limitaciones anteriores, propias de los Métodos de Equilibrio Límite y las simplificaciones de los análisis bidimensionales, es sorprendente el éxito logrado en los análisis de situaciones reales. Sin embargo, durante las últimas décadas, se han investigado e implementado numerosos métodos tridimensionales para el análisis de taludes. El interés en el análisis tridimensional de estabilidad de taludes parece estar impulsado por el hecho de que la mayoría de las fallas de estabilidad de taludes son de carácter inherentemente tridimensional, es decir, la superficie de falla con mucha frecuencia presenta variaciones con la superficie del terreno, que difícilmente pueden ser previstas por el ingeniero.

De esta manera, teniendo en consideración la cercanía con la carretera y la subestructura al talud ubicado en el lado oeste del sector sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707, se utilizó el Modelo de Elevación Digital (MED) obtenido con la ayuda del VANT, los parámetros y propiedades de los materiales estimados anteriormente y el uso del software SLIDE3 del paquete de programas de RocScience, para llevar a cabo un análisis de estabilidad de taludes. La Figura 10 muestra el MED levantado por el VANT para el sitio de análisis, donde la escala de colores representa las elevaciones del terreno, donde los colores azules representan los puntos con mayores alturas, el color verde alturas intermedias y los colores rojos los puntos más bajos.

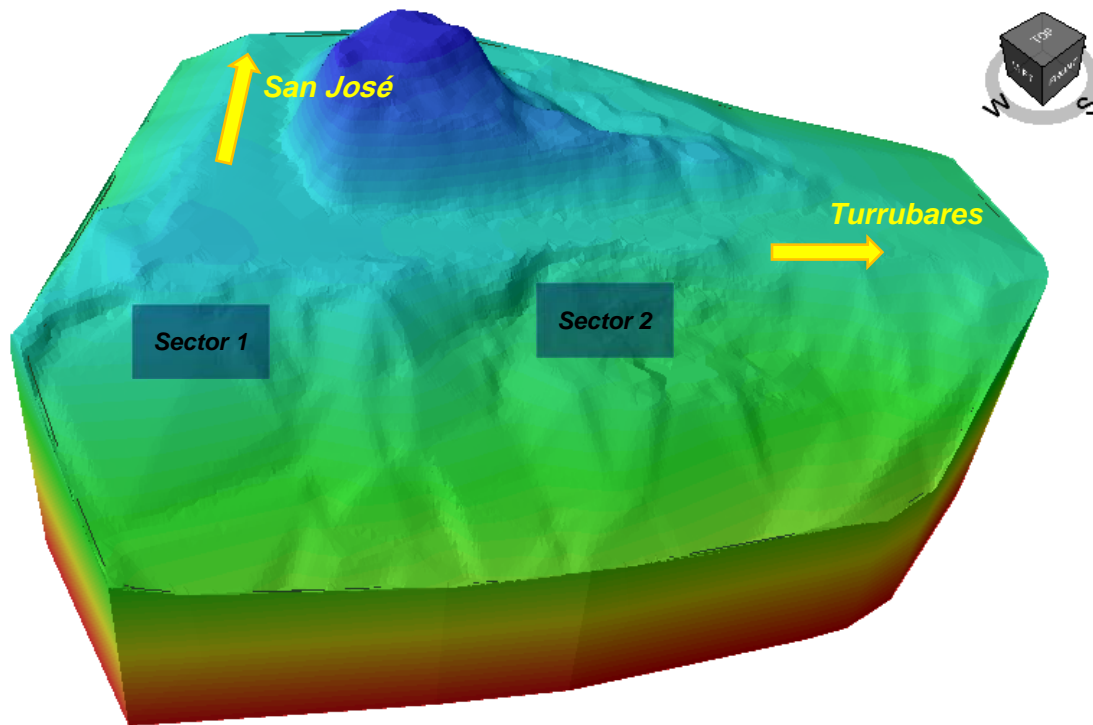


Figura 10. Modelo de elevación del área de estudio próxima al puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707 utilizado en el software SLIDE3 de la zona de estudio

El objetivo del análisis de estabilidad es obtener un factor de seguridad a partir de metodologías de análisis de equilibrio límite. De acuerdo con las recomendaciones establecidas en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR), se considera para el sitio de estudio el riesgo de pérdidas humanas en un nivel bajo y el riesgo de daños económicos y ambientales en un nivel medio, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,30 en condición estática. Se considera la condición de sismo (pseudo-estática) utilizando el coeficiente de aceleración del suelo de 0,15 g definido en el CGTLCR para el sitio ubicado en Zona III con tipo de suelo S3-S4 > 1,0. No obstante, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos de esta región ya que, la información disponible y el estudio completo correspondiente, deben ser asignados a un profesional en geotecnia

responsable del análisis y propuestas de implementación de obras de estabilidad de taludes. Sin embargo, constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que puede sufrir la estructura de pavimento y el puente.

En la Figura 11 se muestran los mapas de los factores de seguridad y la escala de colores correspondiente de los factores de seguridad para la apropiada interpretación de los mapas sobre la superficie analizada, tanto para la condición estática como pseudo-estática, utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop. Como se puede observar los factores de seguridad más bajos se concentran en el talud norte del montículo que se encuentra próximo al puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707, con valores de factores de seguridad superiores a 1,95 en la condición estática y 1,59 en la condición pseudo-estática, lo cual muestra un cumplimiento con las recomendaciones dadas por el CGTLCR de valores superiores a 1,3 y 1,0, para las condiciones estáticas y pseudo-estáticas, respectivamente.

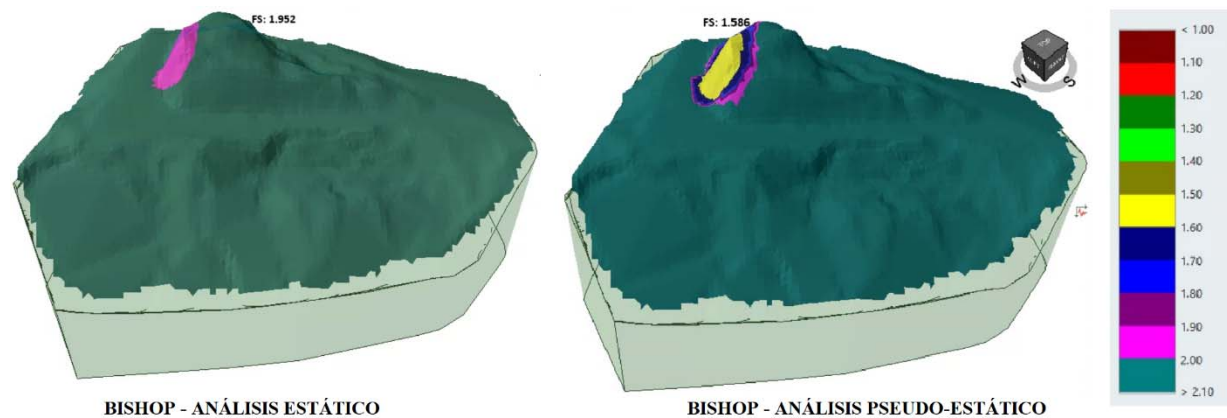


Figura 11. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software SLIDE3 de la zona de estudio para una condición estática y pseudo-estática

Por su parte, en la Figura 12, se presentan los resultados cuando se ejecuta el análisis con la metodología de Janbu, en este caso los resultados son un poco más conservadores con factores de seguridad ligeramente inferiores a los obtenidos con Bishop, con valores de factores de seguridad mayores a 1,87 en la condición estática y 1,48 en la condición pseudo-estática, lo cuales también cumplen con los valores recomendados de 1,3 y 1,0, para las condiciones estáticas y pseudo-estáticas, respectivamente.

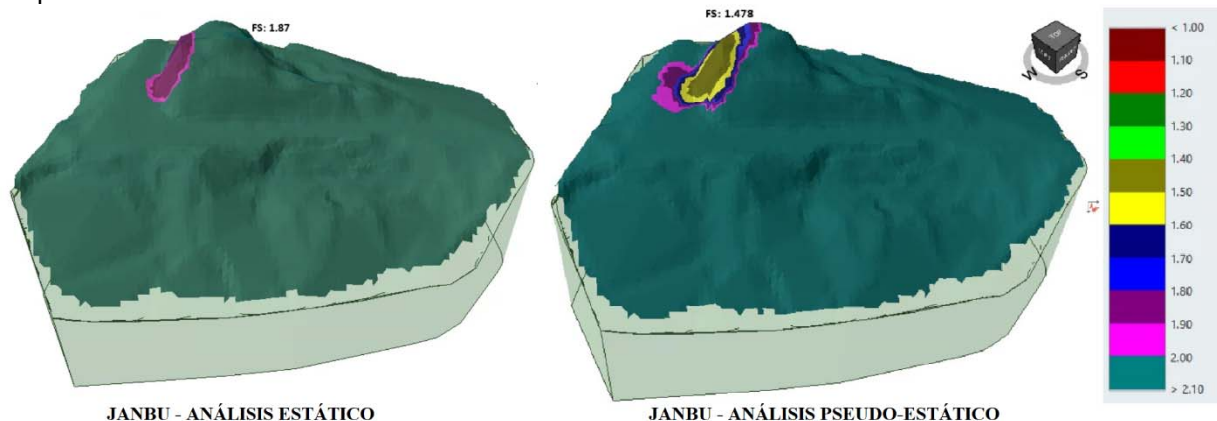


Figura 12. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Janbu en el software SLIDE3 de la zona de estudio para una condición estática y pseudo-estática



Es importante resaltar que, independientemente de la metodología utilizada para los análisis de estabilidad, en todos los casos los factores de seguridad se cumplen con los requisitos de estabilidad definidos en el CGTLCR. Se debe tener en consideración que estos análisis están considerando la condición de la topografía actual del terreno, y por lo tanto no se están considerando la colocación de ninguna actividad de estabilización de los taludes, ni tampoco los efectos negativos que puede generar la presencia de un nivel freático o bien, por la escorrentía superficial. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, en la visita en campo, la zona de estudio carece de sistemas de control de las aguas superficiales, por lo cual, se recomienda mejorar las condiciones de drenaje de todos los taludes próximos al puente, ya que el mal manejo de las aguas de escorrentía superficial resultaría en un detonante de la erosión e inestabilidad de la masa de suelo. Adicionalmente es importante resaltar que todos los análisis se ejecutaron bajo la suposición de que la conformación del talud es homogénea, es decir, correspondiente a un único material, por lo que, para la ejecución de análisis más específicos se considera importante realizar una exploración geotécnica más a detalle para poder establecer un modelo geotécnico más preciso del sitio.

No obstante, en el caso del sector 1, es probable que las consideraciones anteriores no sean representativas de lo observado en campo, puesto que no considerar las propiedades del relleno granular en el modelo anterior indicaría que este sector ya ha alcanzado una condición de equilibrio y, por lo tanto, no se esperarían otros deslizamientos en este sector. Por esta razón, se procedió a realizar nuevas simulaciones que pretenden ser más representativas para solventar las limitaciones indicadas en el modelo utilizado.

#### **IV.2 Resultado de estabilidad de una estimación de la condición inicial utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)**

Cómo se indicó anteriormente, debido a que los análisis de equilibrio límite preliminares presentados anteriormente mostraron valores de factores de seguridad superiores a las recomendaciones indicadas por el CGTLCR, se propone a continuación un análisis de estabilidad considerando una estimación de la condición inicial del terreno, con la topografía que debería tener el terreno antes de los problemas de estabilidad mostrados en las Figuras 6 y 7, para los sectores 1 y 2 identificados anteriormente, como un intento de estimar las condiciones de seguridad originales de la zona de estudio.

Para ello, en el caso del sector 1, como se mencionó anteriormente, de la visita realizada se observó la presencia de un material de relleno granular que sugiere que en este sector existía un muro mecánicamente estabilizado. Por esta razón, se propone para este sector una simulación de un talud no homogéneo, es decir, un talud en el cual se ha colocado sobre el terreno natural un relleno de material granular, con las propiedades típicas utilizadas para estos materiales, a saber: peso volumétrico unitario de  $20 \text{ kN/m}^3$ , cohesión igual a  $0 \text{ KPa}$  y ángulo de fricción igual a  $30^\circ$ . De esta forma, como se muestra en la Figura 13, las curvas de nivel de la condición actual (Figura 13a) se modifican para las curvas de nivel mostradas en la Figura 13b.

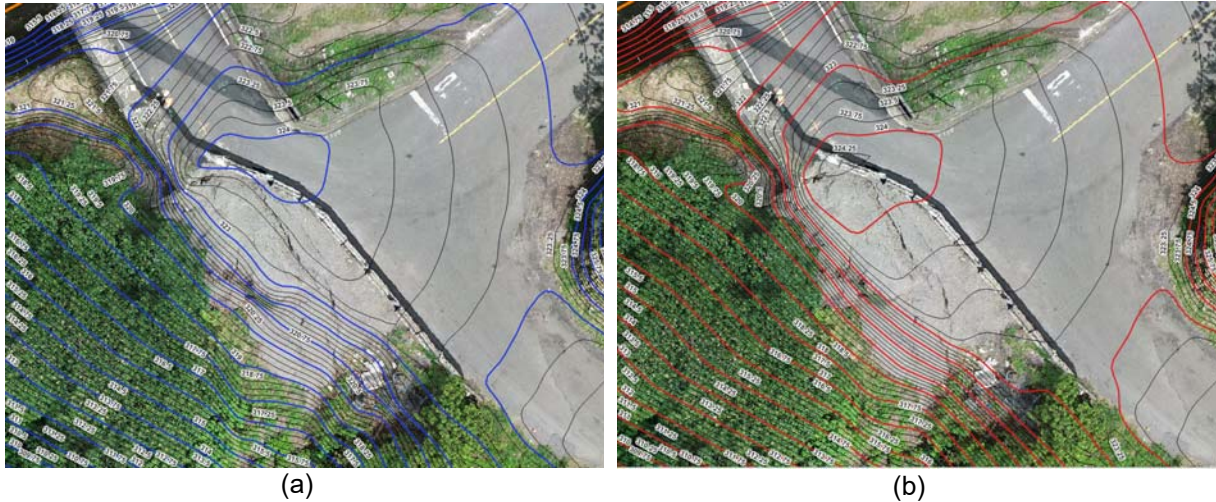


Figura 13. Curvas de nivel en el sector 1: (a) condición actual (b) condición inicial del terreno, antes de los problemas de estabilidad observados en campo

De esta manera, según se muestra en la Figura 14, la sección transversal supuesta en este sector comprende un relleno granular de aproximadamente 4,0 m de altura y un ancho de 9,5 m, consistente con lo observado en campo.

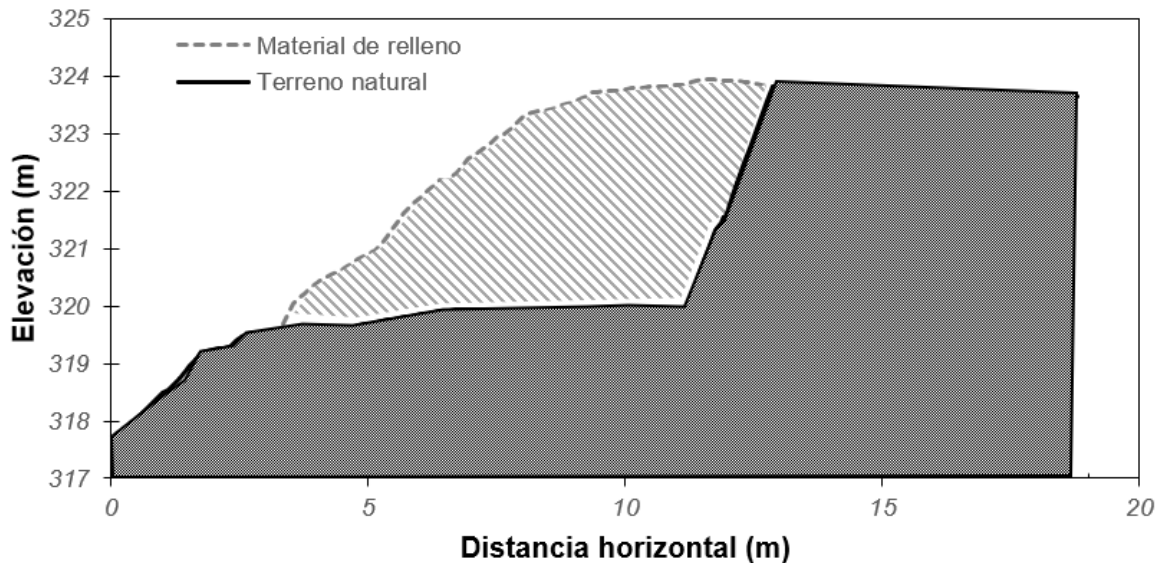


Figura 14. Sección transversal supuesta de la condición inicial del terreno, antes de los problemas de estabilidad observados en campo en el sector 1

Por otro lado, en el caso del sector 2, se propone una simulación considerando un talud homogéneo y en el cual no se ha presentado el problema de estabilidad observado, de forma tal que la sección transversal considerada para este sector puede ser representada como se muestra en la Figura 15.



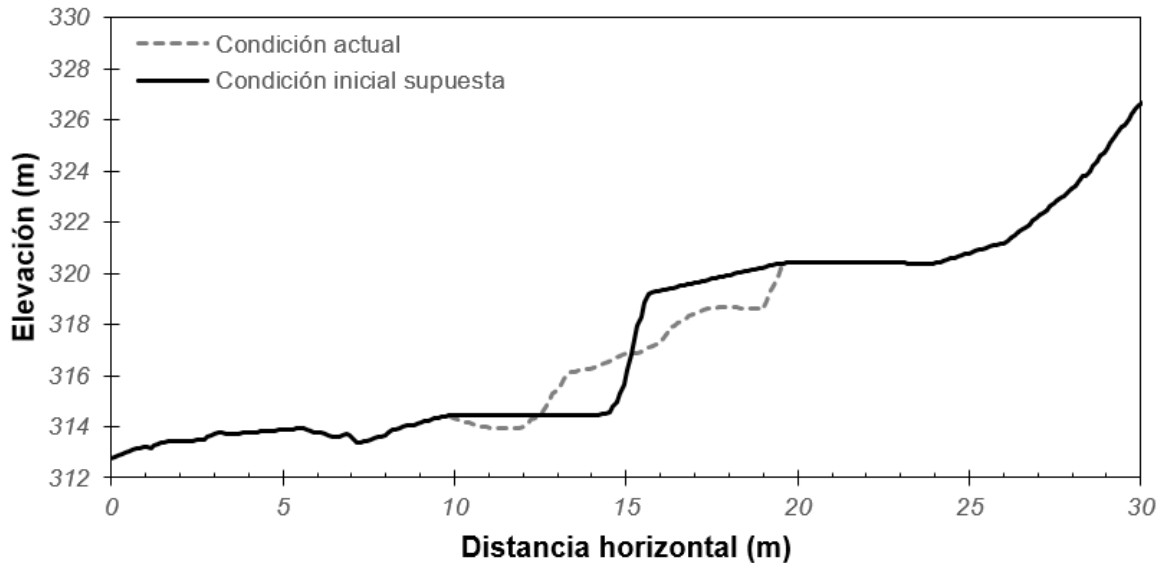


Figura 15. Sección transversal supuesta de la condición inicial del terreno, antes de los problemas de estabilidad observados en campo en el sector 1

Teniendo en consideración las modificaciones en la topografía de las suposiciones propuestas anteriormente, se procedió a utilizar nuevamente el software SLIDE3 del paquete de programas de RocScience, para llevar a cabo un análisis de estabilidad de los taludes con el objetivo de establecer un factor de seguridad de las condiciones “originales” de estos sectores, es decir, antes de que se presentaran los problemas de estabilidad en los taludes y comparar los valores obtenidos con las recomendaciones establecidas en el CGTLCR tanto en la condición estática como en la pseudo-estática.

La Figura 16 muestra los mapas de los factores de seguridad y la escala de colores correspondiente utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop. Como se puede observar los para factores de seguridad más bajos se concentran en el sector 1, próximo al relleno de aproximación del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707, con valores de factores de seguridad inferiores 1 tanto en la condición estática, como en la condición pseudo-estática, lo cual muestra un incumplimiento con respecto las recomendaciones dadas por el CGTLCR de valores superiores a 1,3 y 1,0, para las condiciones estáticas y pseudo-estáticas, respectivamente.

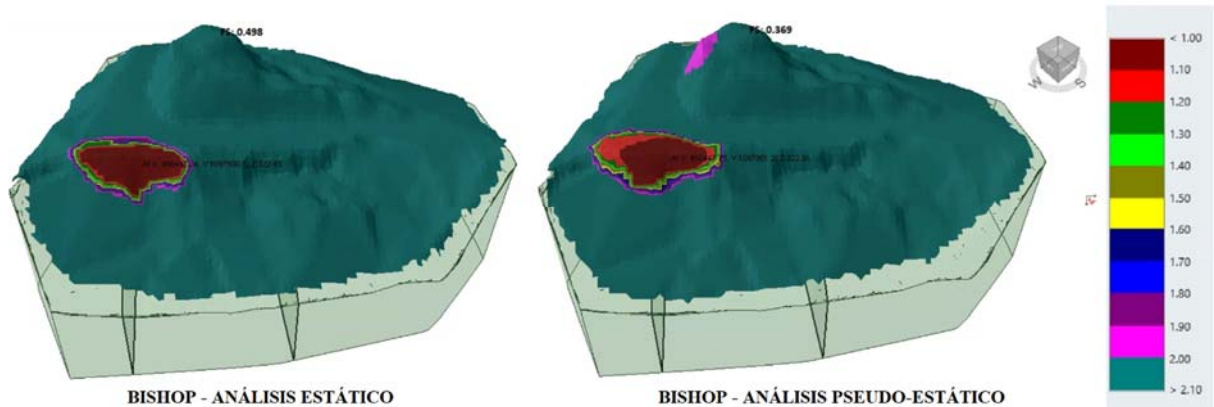


Figura 16. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software SLIDE3 de la zona de estudio para una condición estática y pseudo-estática

De igual manera, la Figura 17 presenta los resultados cuando se ejecuta el análisis con la metodología de Janbu, donde nuevamente los valores de los factores de seguridad son inferiores 1 en la condición

estática y en la condición pseudo-estática, lo cual muestra un incumplimiento con respecto las recomendaciones dadas por el CGTLCR. Ambos resultados confirman que el relleno del talud ubicado en el lado oeste del sector sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707 (denominado como sector 1) presentaba factores de seguridad inferiores a las recomendaciones del CGTLCR, por lo cual se sugiere solicitar los detalles del diseño geotécnico de la obra de estabilización que se había construido en este relleno de aproximación para analizarlo con más detenimiento y poder incluir así, la condición de la topografía actual y las propiedades los materiales para establecer las condiciones de seguridad actuales y posibles obras de intervención y mitigación.

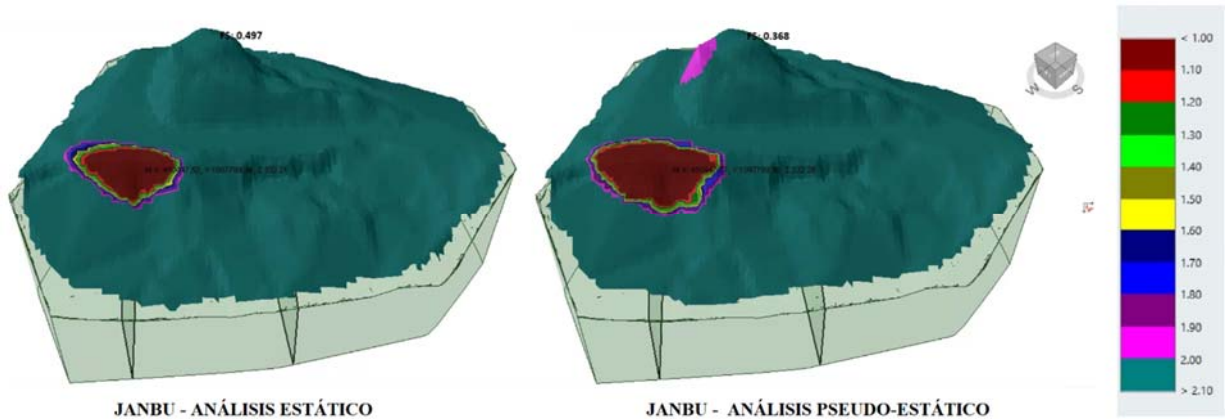


Figura 17. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Janbu en el software SLIDE3 de la zona de estudio para una condición estática y pseudo-estática

Por otro lado, como pueden observarse en las Figuras 16 y 17, en el caso del sector 2, los factores de seguridad obtenidos en las simulaciones se mantienen con valores superiores a 2, tanto en la condición estática y pseudo-estática. Así pues, es importante resaltar que existen diferencias entre lo observado en sitio, en donde se observaron problemas de estabilidad del talud, y los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, donde los factores de seguridad fueron mayores que 2. En este sentido, es importante resaltar nuevamente que todos los análisis se ejecutaron bajo la suposición de que la conformación del talud es homogénea y con un único material, por lo que se considera importante realizar una exploración geotécnica más a detalle para poder verificar y establecer el modelo geotécnico específico del sitio, y determinar en nuevas simulaciones, similitudes o diferencias entre los resultados obtenidos.

No obstante, tal y como se indicó en el apartado II.2, los taludes carecen de sistemas para el control de escorrentía superficial, lo cual no permite la adecuada evacuación de las aguas provenientes de la lluvia, lo que puede constituir en un elemento disparador de problemas de erosión en los taludes, aumento de la presión de poros en los materiales y reducción de los esfuerzos efectivos que pueden disminuir los parámetros de resistencia de los materiales y agravar la situación de estabilidad del talud, consideraciones que no fueron tomadas en cuenta en las simulaciones realizadas y cuyo análisis, en conjunto con cualquier otra condición crítica deben ser realizadas por un profesional en geotecnia responsable para establecer las propuestas de obras de estabilidad de taludes.

## V. Comentarios finales

Teniendo en consideración los resultados mostrados en las secciones anteriores, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, deben ser asignados a un profesional en geotecnia responsable de realizar el análisis completo y emitir las propuestas e implementación de obras de estabilidad de taludes necesarias. Sin embargo, constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para



llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que puede sufrir la estructura del pavimento y el puente.

Se sugiere llevar a cabo estudios adicionales incluyendo ensayos de laboratorio y en sitio, es decir una exploración geotécnica más a detalle, así como la limpieza de material vegetal en la cara del talud para establecer con mayor certeza la topografía real del sitio. La omisión de estos análisis podría significar problemas económicos, accidentes vehiculares y riesgo a vidas humanas. Es por ello, que se considera recomendable realizar la exploración geotécnica detallada para establecer un modelo geotécnico más representativo del sitio y, posterior a esto, realizar los respectivos análisis de estabilidad en condición tanto estática como pseudo-estática, para las diferentes propuestas de estabilización del talud y su respectiva optimización.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones de la condición actual se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados y las condiciones evaluadas, los resultados de los factores de seguridad fueron favorables y que cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR. No obstante, las simulaciones realizadas donde se realizaron estimaciones de las condiciones originales de la zona de estudio (es decir, antes de que se presentaran problemas de estabilidad) confirmaron que el relleno del talud ubicado en el lado oeste del sector sur del puente sobre la ruta nacional 27, en la ruta nacional 707 (denominado como sector 1) presentó factores de seguridad inferiores a las recomendaciones del CGTLCR. Por esta razón, se sugiere solicitar los detalles del diseño geotécnico de la obra de estabilización que se había construido en este relleno de aproximación, con la finalidad de hacer una evaluación más detallada de este sector y confirmar si se ha alcanzado, o no, una condición más estable, o bien, verificar la pertinencia de establecer las propuestas de estabilización para restablecer la circulación de los vehículos en este punto.

También se considera importante realizar análisis de esfuerzo-deformación en el bastión del puente usando el Método de Elementos Finitos (MEF) una vez se hayan realizado las propuestas de estabilidad, con el fin de verificar el estado límite de servicio de la estructura.

Adicionalmente, se resalta nuevamente que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial, se recomienda implementar medidas integrales de mitigación para detener y evitar la erosión de la cara de los taludes, así como, colocar sistemas para el control de la escorrentía superficial y evitar que se magnifiquen los problemas de estabilidad que fueron observados.

## VI. Referencias

1. Marinos, P.; Hoek, E. (2000). **GSI: A geologically friendly tool for rock-mass strength estimation**. Proc. Geo. Eng. 2000 at the Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne. Technomic Publishers, Lancaster, Pennsylvania, pp. 1422–1446.
2. Programa de Ingeniería Geotécnica (2022). **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**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
3. Ruiz, P.; Arauz, A.; García, J.; Villalobos, G.; Sedó, A.; Suárez, C. (2015). **Drenaje ácido de rocas en taludes de la ruta nacional 27, San José – Caldera, Costa Rica**. Revista Geológica de América Central, 53: 25-46. San José, Costa Rica. DOI: 0.15517/rgac.v53i0.21146
4. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2020). **Informe de Evaluación del Proyecto San José – Caldera Ruta Nacional 27, Años 2019 – 2020**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
5. Vassilis, M.; Trevor, C. (2018). **Maintaining geological reality in application of GSI for design of engineering structures in rock**. Engineering Geology 239: 282-297. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.022>