



Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-1708-2023

**Informe de evaluación de la condición de estabilidad de los
taludes del tramo de carretera de montaña de la Ruta
Nacional n°2
INFORME FINAL**



Preparado por:
Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc.
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica
Diciembre, 2023

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 1 de 38
-----------------------------------	-------------------	----------------



1. Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Informe de evaluación de la condición de estabilidad de los taludes del tramo de carretera de montaña de la Ruta Nacional n°2		4. Fecha del Informe 14 de diciembre de 2023
5. Organización y dirección 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		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen <i>Debido a las condiciones de estabilidad observadas a lo largo del tramo de montaña de la Ruta Nacional N°2, este informe presenta un análisis de carácter preliminar de la estabilidad de los taludes que puede ser utilizado como insumo para análisis detallados por parte de la Administración. Los resultados de las modelaciones indican que, en la mayoría de los casos, los resultados de los factores de seguridad en la modelación tridimensional, en términos generales, presentaron incumplimientos con los valores mínimos recomendados por el CGTLCR, especialmente cuando fueron consideradas las condiciones saturadas de los taludes. Es necesario destacar que, en la visita de campo, fue posible observar que los taludes analizados carecen de sistemas de drenaje superficial y control de la escorrentía superficial, ambos aspectos se consideran de alta importancia ante la falta de protección superficial de la cara del talud observada en sitio. Debido a esto se considera apropiado implementar medidas que favorezcan la estabilidad del talud, como lo es el manejo de aguas de escorrentía superficial y evitar así que se magnifiquen los problemas de estabilidad que fueron observados. Es importante destacar que este análisis no es definitivo, sin embargo, constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis adicionales con un mayor grado de detalle, que deben ser realizados por el profesional en geotecnia responsable asignado por la Administración para emitir las propuestas e implementar las obras requeridas, si fuese necesario.</i>		
8. Palabras clave Modelo de elevación digital (MED), método de equilibrio límite (MEL), drenaje natural, escorrentía superficial.	9. Nivel de seguridad: -	10. Núm. de páginas 37
11. Preparado por: Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc. Programa Ingeniería Geotécnica		
12. Revisado por: Lic. Giovanni Sancho Coordinador Unidad de Asesoría Legal		
13. Revisado y aprobado por: Ana Lorena Monge Sandí, MSc. Coordinadora Programa Ingeniería Geotécnica		



Contenido

Resumen ejecutivo	5
I. Introducción	6
I.1 Antecedentes	7
II. Objetivos	9
II.1 Objetivo general	9
II.2 Objetivos específicos	9
III. Metodología	9
III.1 Uso de la herramienta para la evaluación de la condición de los taludes	9
III.1.1 Caracterización del talud	10
III.1.2 Observaciones en la zona del talud	12
III.1.3 Clasificación de la condición del talud	13
III.2 Modelo de elevación digital (MED)	13
III.3 Comprobación de estabilidad de los taludes utilizando el método de equilibrio	14
IV. Descripción general del sitio	15
IV.1 Geología local de la zona	16
V. Resultados	18
V.1 Aplicación de la herramienta para la evaluación de la condición de taludes	18
V.2 Estabilidad de taludes de sitios específicos	23
V.3 Resultados utilizando el método de equilibrio límite MEL en sitios específicos	29
VI. Comentarios Finales	36
VII. Referencias	37



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del tramo evaluado.....	16
Figura 2. Mapa geológico de formaciones y rocas asociadas a la ruta nacional 2, en el tramo evaluado.....	17
Figura 3. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.7385102, -83.954189 (48+800).....	19
Figura 4. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.5320084, -83.7106293 (102+835).....	19
Figura 5. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.529293, -83.7022765 (104+250).....	20
Figura 6. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.5262367, -83.7024169 (105+375).....	20
Figura 7. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.483692, -83.685668 (112+820).....	21
Figura 8. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.4740569, -83.6935618 (117+775).....	21
Figura 9. Ubicación gráfica del inventario de taludes con evidencias de inestabilidad a lo largo del tramo de carretera de montaña de la RN2.....	23
Figura 10. Caracterización de un macizo rocoso fracturado en función de la trabazón del macizo y las condiciones de sus discontinuidades.....	27
Figura 11. Condición del macizo rocoso observado en las proximidades del km 105+375 de la RN 2.....	28
Figura 12. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en los diferentes sitios analizados: (a) método de GLE/Morgestern-Price, (b) método de Spencer.....	30
Figura 13. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 1 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático.....	32
Figura 14. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 2 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático.....	33
Figura 15. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 3 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático.....	34
Figura 16. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 4 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de puntos evaluados en el informe LM-PI-UGERVN-006-2021.....	8
Tabla 2. Características generales para clasificar el material predominante de un talud.....	10
Tabla 3. Clasificación del modo de falla de un talud según el tipo de material predominante.....	12
Tabla 4. Ubicación de los sitios identificados con la herramienta rápida.....	22
Tabla 5. Taludes analizados con el método de equilibrio límite (MEL).....	25
Tabla 6. Valores de la constante m_i para roca intacta por tipo de roca.....	25
Tabla 7. Propiedades de los materiales a utilizar en los análisis de estabilidad.....	29
Tabla 8. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en los diferentes sitios analizados.....	29



Resumen ejecutivo

Este informe tiene como propósito realizar una evaluación preliminar de los taludes a lo largo del sector montañoso de la Ruta Nacional N°2 (RN2), la cual es una ruta de suma importancia que conecta el valle central del país con la zona del sur del país. El mismo puede ser utilizado como insumo por las autoridades responsables de la gestión y mantenimiento de la RN2, así como para los profesionales involucrados en proyectos de infraestructura vial.

Dadas las condiciones geológicas y climáticas de la región montañoso a lo largo de la RN2, resulta fundamental realizar evaluaciones periódicas de estos taludes para detectar posibles riesgos y proporcionar recomendaciones para mitigar las posibles inestabilidades de los taludes.

Este informe se enfoca en un análisis preliminar de los taludes que presentan evidencia de inestabilidad a lo largo del tramo comprendido entre Cartago y San Isidro de Pérez Zeledón (tramo entre el kilómetro 25+258 hasta el 124+885). Las características propias de la zona en que se construyó esta vía, sumado a taludes de gran altura con pendientes desfavorables para los tipos de materiales presentes, la ausencia de sistemas de drenaje y protección de la escorrentía superficial, la falta de mantenimiento preventivo y las técnicas constructivas empleadas, favorecen las condiciones inestables observadas. Se recomienda implementar medidas integrales de mitigación para prevenir y detener la erosión de la cara de los taludes, junto con sistemas para el control de la escorrentía superficial, evitando así agravar los problemas de estabilidad observados.

Se ha realizado un inventario de sitios en los que se han observado indicios de inestabilidad o que por su condición actual se puede suponer que son el resultado de deslizamientos previos. Este inventario proporciona información sobre eventos pasados y su frecuencia, así como lugares con condiciones desfavorables para la estabilidad del talud, lo que permite identificar áreas con mayor densidad de sitios inestables que se pueden categorizar como propensas a deslizamientos.

Los resultados de esta evaluación ofrecen información valiosa para identificar sitios específicos con inestabilidades durante el período de la evaluación. Además, se proporcionan recomendaciones generales para el mantenimiento de los taludes y la prevención o mitigación de posibles deslizamientos.

Es importante enfatizar que, aunque estos análisis cuentan con respaldo técnico adecuado, existen limitaciones en la exploración geotécnica de los sitios específicos abordados en este informe. Por lo tanto, estos análisis no representan resultados definitivos para tomar decisiones finales o recomendar diseños de obras. Para ello, se requiere un estudio completo que debe ser realizado por un profesional en geotecnia designado por la Administración para emitir propuestas e implementar obras de estabilidad de taludes, en caso de ser necesarias. Se insta a realizar estudios geotécnicos exhaustivos y a considerar todas las variables para tomar decisiones informadas y seguras. La omisión de estos aspectos podría llevar a riesgos económicos tanto para la Administración como para los usuarios.

Se recomienda considerar las condiciones de saturación de los materiales, así como diferentes propuestas de estabilización de taludes y su respectiva optimización. Es fundamental entender que la saturación del suelo puede modificar la distribución de esfuerzos en el talud y, por lo tanto, influir en la ubicación y forma de la superficie de falla. Esto varía según el tipo de suelo y las condiciones específicas del sitio. Además, se aconseja complementar los análisis de estabilidad con análisis de esfuerzo-deformación en las zonas cercanas a la superficie de ruído utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF). Esto permitirá evaluar posibles afectaciones a la vía desde el punto de vista de deformaciones.

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 5 de 38
-----------------------------------	-------------------	----------------



Evaluación de la condición de estabilidad de los taludes del tramo de carretera de montaña de la ruta nacional n°2

I. Introducción

El presente informe tiene como objetivo realizar una evaluación preliminar, pero a detalle de los taludes a lo largo de la carretera de montaña ubicada en el Ruta Nacional n°2 (RN2). Esta vía desempeña un papel fundamental en el transporte de personas y mercancías, conectando la zona sur del país con el valle central facilitando el desarrollo económico.

El trazado de la ruta fue escogido en la divisoria de aguas entre las vertientes del Caribe y del Pacífico en función de dos objetivos principales: enlazar las poblaciones principales de los países que forman parte de la Carretera Panamericana en la trayectoria más corta posible y, en segundo lugar, reducir el número y la longitud de los puentes (cruces y pasos de cauces o ríos principales) necesarios para construir, siendo este segundo factor el más importante desde punto de vista económico. No obstante, su ubicación topográfica condicionó la geometría de la ruta y la velocidad de diseño a 50 kilómetros por hora, con cortes frecuentes en los terrenos con altas pendientes que superan en muchos casos los 10 metros de altura.

En el tramo comprendido entre Cartago y San Isidro de Pérez Zeledón (localizada entre el kilómetro 25+258 hasta el 124+885) la ruta puede ser clasificada como una ruta montañosa debido a su topografía, por lo que los análisis se enfocan en las diferentes condiciones que pueden afectar la estabilidad de los taludes y condicionar el adecuado funcionamiento de la carretera, como pueden ser deslizamientos o inundaciones, así como otros factores geotécnicos que puedan afectar la carretera.

Las características propias de la zona en que se construyó esta vía, sumado a taludes de gran altura con pendientes desfavorables para los tipos de materiales presentes, la ausencia de sistemas de drenaje y protección de la escorrentía superficial, la falta de mantenimiento preventivo y las técnicas constructivas empleadas, favorecen las condiciones inestables observadas en este corredor vial.

En este sentido, las características geológicas y climáticas de la región montañosa donde se encuentra esta ruta nacional requieren la realización de evaluaciones periódicas de monitoreo de los taludes para identificar posibles riesgos y brindar recomendaciones para mitigarlos de forma oportuna.

Así pues, en este informe se presentan los resultados de los análisis realizados a algunos de los taludes que presentan indicios de inestabilidad a lo largo del tramo de la carretera. Considerando aspectos como su pendiente o grado de inclinación, material geológico, erosión, drenaje y presencia de vegetación. Además, se tomará en consideración para los análisis de estabilidad de los taludes factores externos como precipitaciones y movimientos sísmicos, así como también, las estructuras cercanas que se puedan ver afectadas por un posible deslizamiento de material.

Adicional a la evaluación general de los taludes, se cuenta con un inventario de los sitios en los que se observaron indicios de inestabilidades o que aparentan ser el resultado de un deslizamiento antiguo. Este inventario de deslizamientos proporciona información sobre eventos pasados y su frecuencia, así como sitios en los que se observan condiciones desfavorables para la estabilidad del talud, lo que permite identificar zonas propensas a deslizamientos.



Los resultados de esta evaluación representan un insumo que permitirán tener un conocimiento de los sitios específicos que al momento de la evaluación presentan inestabilidades de algún tipo, así como recomendaciones técnicas generales para el mantenimiento de los taludes y prevención o mitigación de posibles deslizamientos.

1.1 Antecedentes

En vista de la importancia estratégica de la RN2, se han realizado diversos estudios a lo largo de los años para comprender las condiciones del terreno y los desafíos geotécnicos presentes en esta carretera, esto por cuanto RN2 atraviesa una variedad de formaciones geológicas que se describen con mayor detalle en los próximos apartados. El tramo analizado se localiza en la Cordillera de Talamanca, en donde la mayoría del tramo de estudio se ubica en la divisoria de aguas entre las vertientes del Caribe y del Pacífico. En este tramo, el punto más elevado se encuentra en el Cerro Buenavista (también conocido como “Cerro de la Muerte”) a una altura de 3330 metros sobre el nivel del mar (msnm) y el punto más bajo se encuentra localizado en San Isidro de Pérez Zeledón (700 msnm). Presenta una precipitación promedio anual que varía entre 1500 mm, en el sector de Cartago, hasta 4000 mm en San Isidro de Pérez Zeledón.

En el año 2004, el Programa de Investigación en Riesgos y Amenazas Naturales en la Infraestructura Vial del LanammeUCR, presentó el informe “Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de la RN2 Carretera Interamericana Sur Tramo San Isidro del Guarco– San Isidro de Pérez Zeledón” en cual se determinó un perfil de vulnerabilidad potencial de exposición de la infraestructura vial ante deslizamientos de la ruta, adicionalmente se propusieron planes preliminares para la reducción de la vulnerabilidad a nivel general. Es decir, las recomendaciones propuestas no abarcaron la etapa de diseño detallado de obras de mitigación, puesto que se requiere de estudios a nivel de detalle para definir los diseños específicos.

La Unidad de Gestión de Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del LanammeUCR, también ha realizado en el pasado evaluaciones de la vulnerabilidad ante amenazas naturales de diferentes tramos de la ruta. En el informe LM-GI-EV-01-2009 “Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica. Año 2008” se presentaron los resultados de unos análisis de perfiles de vulnerabilidad de algunos segmentos y componentes estructurales de las carreteras, tales como taludes de corte o relleno, alcantarillas y puentes. La metodología aplicada empleó sistemas de información geográfica (SIG), a partir de información digital de los factores técnicos y complementada con visitas de campo. En este informe, se consideró que el riesgo de las carreteras es el producto de dos factores principales: la amenaza y la vulnerabilidad. Donde la amenaza fue considerada como un factor existente en la naturaleza y la vulnerabilidad es un factor causado o fabricado por el ser humano. La integración de ambos factores permitió generar “perfiles longitudinales de vulnerabilidad” en segmentos de 200 m de longitud. En el informe se concluye que en esta ruta los deslizamientos de los taludes de corte, de los terraplenes de relleno y de pendientes altas del terreno natural son las mayores amenazas para la ruta. Estas amenazas se ven aumentadas por la falta de mantenimiento preventivo y de limpieza de las cunetas, contracunetas y obras de estabilización de los taludes.

En el año 2018, la UGERVN realizó en el informe LM-PI-UGERVN-014-2018, una evaluación de un talud localizado en el estacionamiento 38+100 (coordenadas 502540, 1082880, CRTM 05) en el cual se presentaron algunos problemas de inestabilidad. Debido al material deslizado la carretera de la RN 2 tuvo que permanecer cerrada durante varios días. Según el informe, los materiales geológicos presentes en el sitio correspondían con lavas de tipo andesitas de la Formación La Cruz, con diferentes grados de meteorización y alteración hidrotermal. En esta evaluación fue generado un modelo de elevación digital utilizando un levantamiento fotogramétrico con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) con el fin de analizar la forma de la superficie del talud y sus implicaciones en la estabilidad de este. No obstante, no fueron realizados análisis de estabilidad de taludes con un

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 7 de 38
-----------------------------------	-------------------	----------------



software específico para esta finalidad y limitándose a entrega de información hacia la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del Consejo Nacional de Vialidad dada sobre una solicitud realizada sobre el procedimiento establecido para la atención de este tipo de eventos.

En el 2021 se publicó el informe LM-PI-UGERVN-006-2021 “Análisis de sitios con vulnerabilidad a deslizamiento Ruta Nacional N°2. Tramo San Isidro del Guarco – San Isidro del General” el cual tenía como objetivo identificar las condiciones de riesgo de diferentes sitios ubicados en el sector de montaña de la RN2 que pudieran generar interrupción en el tránsito vehicular y una afectación directa a los usuarios en caso de condiciones de lluvia o sismos. En este trabajo se hicieron diversas giras de campo durante las cuales se evaluaron las condiciones geológicas, topográficas y de manejo de aguas superficiales de los sitios evaluados. En algunos puntos fueron realizados levantamientos fotogramétricos con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para la generación de modelos de elevación digital, ortofotografías, análisis geomorfológicos y geológicos y análisis de vulnerabilidad de las condiciones de los sitios evaluados. En total fueron evaluados 16 puntos específicos que presentaron evidencias de deslizamiento desde el 2015 y que impactaron el funcionamiento de la carretera. En la Tabla 1 se muestra la ubicación de los puntos evaluados. Entre las observaciones y conclusiones obtenidas en este informe se desprende que los 10 primeros puntos habían recibido algún tipo de intervención y que en el caso de que se presentara el colapso de alguno de ellos, la ruta poseía rutas alternas en la zona de los Santos lo cual reducía la amenaza y, por ende, el riesgo en esta zona. No obstante, los puntos localizados al sur del Cerro de La Muerte, debido a la condición de los materiales, altas pendientes, y altos niveles de humedad y precipitaciones, sumado a la falta de mantenimiento preventivo y de limpieza de las cunetas, contracunetas y obras de estabilización de los taludes hacen que este tramo presente un mayor riesgo y cantidad de taludes inestables.

Tabla 1. Ubicación de puntos evaluados en el informe LM-PI-UGERVN-006-2021

Código	Ubicación (CRTM-05)		Estacionamiento	Elevación (msnm)
	Este	Norte		
P01-R2	505511.00	1084394.00	31+557	1620
P02-R2	505528.00	1083218.00	33+764	1721
P03-R2	502513.00	1082844.00	37+806	1848
P04-R2	502049.26	1082619.67	38+368	1855
P05-R2	501615.00	1082566.00	38+847	1886
P06-R2	500855.00	1081537.00	40+205	1868
P07-R2	501483.85	1080464.69	41+615	1856
P08-R2	501933.00	1079589.00	42+975	1873
P09-R2	505068.00	1076899.00	48+899	2076
P10-R2	505504.00	1076507.00	50+153	2158
P11-R2	514313.00	1069229.00	66+175	2559
P12-R2	522988.00	1062054.00	80+791	2971
P13-R2	531629.67	1055276.80	101+046	2812
P14-R2	531523.01	1054822.05	101+747	2775
P15-R2	532393.11	1053947.53	103+778	2624
P16-R2	532653.46	1053373.33	105+354	2527



II. Objetivos

II.1 *Objetivo general*

Evaluar la RN2 en el sector montañoso, desde el kilómetro 25+258 hasta el 124+885, bajo criterios geotécnicos que permitan identificar zonas en las que los taludes presenten, bajo condiciones de saturación o pseudo estáticas, potencial pérdida de su condición de equilibrio.

II.2 *Objetivos específicos*

Para alcanzar el objetivo general de esta evaluación, se deben considerar los siguientes objetivos específicos:

- Identificar mediante visitas de campo los taludes que por su conformación y condición actual pueden resultar inestables al cambiar su condición de saturación o carga.
- Aplicar a estos taludes la herramienta de evaluación de taludes en carretera creada por el Programa de Ingeniería Geotécnica (PIG) del LanammeUCR.
- Obtener los modelos de elevación de terreno y superficie de los taludes que, una vez evaluados con la herramienta de taludes en carretera, requieran del criterio de un profesional especialista en geotecnia del PIG para brindar las respectivas recomendaciones generales.
- Evaluar, utilizando softwares especializados en geotecnia, los taludes que por sus condiciones geomorfológicas requieran de un análisis de equilibrio límite para determinar los factores de seguridad y compararlos con los indicados en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica.
- Brindar las recomendaciones pertinentes en cuanto a la estabilidad de la zona evaluada.

III. Metodología

Para el desarrollo de este informe se requirió realizar visitas de campo, en las cuales el profesional en geotecnia recorre el tramo de interés identificando los taludes que presentan indicios de inestabilidad. A estos se les aplicó la herramienta de inspección y evaluación de taludes en carretera y, dependiendo del resultado obtenido y del criterio del profesional, se solicita la obtención del modelo de elevación del terreno mediante la técnica de fotogrametría. A los taludes que por sus condiciones geomorfológicas el profesional especialista en geotecnia considere necesario, se aplican análisis con softwares especializados que utilizan la metodología de equilibrio límite para determinar el factor de seguridad ante deslizamiento, y este se compara con lo recomendado en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica.

III.1 *Uso de la herramienta para la evaluación de la condición de los taludes*

Para la evaluación de la condición de los taludes y determinar la clasificación resultante, el PIG desarrolló una herramienta de inspección en el que se establecen dos áreas generales de estudio, a saber:

- La caracterización del talud: En esta se incluyen las características talud, tales como altura, pendiente, material que lo conforma entre otros, así como condiciones climáticas de la zona.
- Observaciones en la zona del talud: En esta, la evaluación se concentra en verificar si hay evidencia de movimiento y si existe alguna posible afectación en la zona circundante al talud.

Mediante la ponderación de los aspectos establecidos para evaluar estas áreas, se obtiene una calificación que no pretende cuantificar la condición de riesgo o vulnerabilidad del talud si no, la identificación de la necesidad o no de recomendaciones técnicas o intervenciones directas a cargo de profesionales en geotecnia, a partir de la evaluación visual del talud la cual puede ser ejecutada incluso por personas con conocimientos básicos de ingeniería geotécnica.

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 9 de 38
-----------------------------------	-------------------	----------------



III.1.1 Caracterización del talud

Esta sección de la guía inicia con la caracterización del talud basándose en las características observadas en campo según las siguientes descripciones:

- Precipitación anual

La herramienta clasificará la precipitación para su ponderación en alguno de los siguientes rangos establecidos:

- Menos de 2000 mm
- 2000 mm – 3000 mm
- 3000 mm – 4500 mm
- 4500 mm – 5500 mm
- Más de 5500 mm

- Pendiente

Se requiere la medición directa de la pendiente del talud que se está evaluando, pues la aplicación realiza su clasificación según los rangos previamente establecidos por PIG:

- Plana a suave: Cuenta con una pendiente menor a 3°, o lo que es lo mismo, tiene una pendiente 1:0,05
- Suave: Cuenta con una pendiente entre 3° a 10°, o lo que es lo mismo, tiene una pendiente entre 1:0,05 a 1:0,18.
- Moderada: Cuenta con una pendiente entre 11° a 20°, o lo que es lo mismo, tiene una pendiente entre 1:0,18 a 1:0,36.
- Abrupta: Cuenta con una pendiente entre 21° a 45°, o lo que es lo mismo, tiene una pendiente entre 1:0,36 a 1:1.
- Escarpada: Cuenta con una pendiente mayor a 45°, o lo que es lo mismo pendientes mayores que 1:1.

- Material predominante

Los requerimientos de estabilidad para taludes dependerán del material del que están conformados, es decir, roca o suelo. Además, un aspecto fundamental es la condición en la que se encuentra el material que conforma el talud, por lo que, para la clasificación del talud, se debe identificar a grandes rasgos y por medio de la observación, el material del que está conformado el talud y su condición utilizando como base los criterios respectivos para cada tipo de material mostrados en la Tabla 2

Tabla 2. Características generales para clasificar el material predominante de un talud

Roca	Suelo
Condición de la roca (compuesto roca/suelo, roca sana, roca fracturada)	Composición del suelo (compuesto suelo/roca, suelo residual, alusión, coluvio, relleno sin conformar/conformado, escombros/basura)
Fracturación de la cara del talud (poco fracturado, medianamente fracturado, altamente fracturado)	Agrietamiento en la cara del talud (sin grietas, medianamente agrietado, altamente agrietado, fallado)
Condición de las discontinuidades (masiva, sin relleno, con relleno)	

- Vegetación

En este punto se debe aportar información y clasificar la vegetación predominante del sitio de estudio en uno de los 6 grandes grupos definidos:

- Bosque primario



- Bosque secundario
- Arbustos
- Pastos mejorados
- Vegetación autóctona
- Pastos naturales
- Ninguna

- Uso de suelo

Se debe calificar el uso de suelo de la zona de estudio ya que esto influye en la complejidad técnica de las recomendaciones, se establecieron 5 grupos principales:

- Terreno natural
- Bosque
- Camino, carretera
- Urbanización densa
- Urbanización esporádica

- Agua en el talud

Se debe indicar la existencia de agua en el talud y basándose en lo observado se debe clasificar el talud de acuerdo con las siguientes condiciones:

- Seco
- Húmedo
- Saturado

Además, se debe indicar en el caso de existir agua la altura a la que se observa, sea desde la corona, a media altura o al pie del talud, ya que la incidencia del agua en la estabilidad del talud puede influir en su ubicación.

Si la presencia del agua en el talud es tal que es posible identificar un flujo aflorando en alguna parte de la cara del talud, se debe indicar el nivel al que se observó, sea desde la corona, a media altura o al pie del talud.

- Manejo de escorrentía superficial

El manejo de aguas ya sea de escorrentía superficial o bien subsuperficiales, es sumamente importante para evitar que un talud se sature por su presencia. La eficacia del sistema de manejo de aguas depende, además de su existencia, de la condición en la que se encuentren, o bien en que tengan el dimensionamiento apropiado. Para la evaluación del talud se debe indicar en caso de existir, la condición del drenaje (buen estado, mal estado, insuficiente, obstruido). Si no existe drenaje se indica si el talud presenta afectación por la escorrentía.

- Altura del talud

La altura del talud corresponde a la medida vertical desde la corona hasta el pie del talud. Se deberá estimar lo más preciso posible haciendo uso de herramientas de medición a distancia con láser, o estimaciones visuales tomando como referencia objetos de altura conocida.

- Forma del talud

Este parámetro resulta importante ya que brinda información más específica de las características del talud que se está estudiando. La forma del talud es un factor que influye de manera directa en la estabilidad de un talud, por lo tanto, se debe clasificar el talud a partir de la observación en campo de acuerdo con las siguientes formas:

- Rectilínea
- Con bermas



- Cóncava
- Convexa
- Compuesta

III.1.2 Observaciones en la zona del talud

En esta sección se contemplan las observaciones que se tengan en campo acerca del talud en cuanto a evidencias que sean un indicio de movimiento en el mismo. Estas observaciones se han caracterizado de la siguiente manera:

- Evidencia de movimiento

Al evaluar la condición del talud, existen evidencias que puede proporcionar naturalmente el terreno, que generan un indicio de que se puede estar presentando una falla en el mismo. En este caso, se debe observar tanto la zona del talud como sus alrededores e indicar si se muestran una o varias de las siguientes condiciones: árboles inclinados, formación de coronas, levantamiento al pie del talud, grietas en el terreno y material caído.

- Modo de falla

Conocer los modos de falla del terreno es importante, pues dependiendo del tipo que se presentó, así se puede planear la medida de contingencia más apropiada. Los tipos de falla difieren si se trata de un talud en suelo o un talud en roca como se indica a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del modo de falla de un talud según el tipo de material predominante

Suelo	Roca
Deslizamiento rotacional	Planar
Deslizamiento traslacional	Cuña
Flujo de detritos	Volcamiento
Expansión lateral	Compuesto
Reptación	
Compuesto	

- Presencia de obras de retención

Las obras de retención son fundamentales para generar estabilidad en el terreno, ya sea en una ladera o en un talud. Por lo tanto, su existencia debe ser considerada en la contribución a la estabilidad. Se consideró la presencia y estado de las obras de retención existentes en el sitio evaluado de acuerdo con las siguientes categorías establecidas:

- Estructura de retención en buen estado
- Estructura de retención insuficiente o en mal estado
- No hay estructuras de retención

- Estructuras o servicios cercanos

Dada la posible inestabilidad del talud evaluado, se considera importante identificar estructuras o redes de servicio que se encuentran en los alrededores del sitio tales como, viviendas o comercios, vías vehiculares, redes eléctricas, redes de agua potable, puentes vehiculares, pasos peatonales, cultivos. Dependiendo de su cercanía, así sería la afectación que podría generar el deslizamiento (si existiese) sobre la estructura, por lo tanto, se establecen los siguientes radios de incidencia:

- 0-3 m
- 3-8 m
- 8-15 m
- Más de 15 m



III.1.3 Clasificación de la condición del talud

Se han establecieron 3 niveles de alcances para la clasificación de la condición del talud evaluado:

- Clasificación Baja: Se considera que el nivel de afectación que tiene el talud y la incidencia sobre la carretera no implican análisis más profundos y por lo tanto un profesional con conocimientos básicos en geotecnia puede realizar algunas indicaciones para mejorar la condición del talud. Entre las recomendaciones básicas que se pueden realizar son:
 - Recomendaciones de manejo de agua de escorrentía superficial si es que no existe, si existe indicar que es insuficiente y que se debe considerar realizar una mejora en el manejo existente
 - Recomendaciones de colocación de drenajes en el propio talud, si es que se observa flujo de agua aflorando en la cara del talud. Sin embargo, se debe indicar que estas intervenciones en el talud deben ir acompañadas de un experto (Ingeniero geotecnista) que indicará la ubicación y cómo debe estar compuesto este drenaje
 - Recomendaciones de colocar algún tipo de método para el manejo de erosión, a saber: vegetación, geomantas, biomantas, entre otros. Sin embargo, se debe indicar que estas intervenciones en el talud deben ir acompañadas de un experto (Ingeniero geotecnista) que indique la forma adecuada de colocar estas alternativas, con el fin de optimizar la solución y no generar problemas mayores a posteriori
- Clasificación Media: Cuando algún talud tenga este nivel de clasificación, se establece que, en este caso, debe ser un profesional con conocimientos especializado en geotecnia quien determine el tipo de recomendación para la intervención del talud.
- Clasificación Alta: Cuando algún talud tenga este nivel de clasificación, se establece que se debe realizar un análisis con mayor detalle y específico del sitio, que incluso contemple el uso de algún software especializado, a cargo de un profesional con conocimientos especializados en geotecnia.

III.2 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 durante los meses de octubre y noviembre de 2022.

Estos levantamientos permitieron la generación de Modelos 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 pueden ser utilizados en programas de diseño asistido por ordenador (conocidos como CAD) o en Sistemas de Información Geográfica (SIG) 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.

A partir del modelo tridimensional, es posible conocer distancias, altitudes, pendientes y volúmenes con un bajo margen de error. Estos modelos trascienden su función, pues dan pie a la creación de superficies, estructuras sólidas y modelos de elevación, todos ellos plasmados en programas de

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 13 de 38
-----------------------------------	-------------------	-----------------



diseño asistido por computadora (CAD) o en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Mediante estas herramientas, se analiza la forma de la superficie del terreno, incluso aquellos puntos inestables que a nivel del suelo no son detectables.

Con estos factores en mente y basándose en el levantamiento llevado con el VANT a alturas de vuelo inferiores a los 100 metros, fue viable obtener un modelo de elevación para cada uno de los taludes que, gracias a la evaluación con la herramienta del PIG para evaluar la condición de los taludes, reciben una clasificación de nivel medio o alto. Los levantamientos efectuados permitieron una precisa recreación de las superficies del terreno (sin la presencia de la vegetación) para llevar a cabo los análisis correspondientes.

III.3 Comprobación de estabilidad de los taludes utilizando el método de equilibrio

En la actualidad, la mayoría de los estudios sobre la estabilidad de taludes se apoyan en los Métodos de Equilibrio Límite (MEL). Estos métodos analizan la relación entre las fuerzas de deslizamiento y las fuerzas de resistencia a lo largo de una superficie de falla determinada. Tradicionalmente, los análisis de estabilidad se ejecutan empleando representaciones bidimensionales, las cuales suponen una reducción de la información real disponible. En estos modelos bidimensionales, el ingeniero diseñador, según su juicio, clasifica las secciones transversales críticas donde un deslizamiento o movimiento de material que provoque inestabilidad del talud podría ocurrir.

No obstante, se debe tener presente que los MEL tienen limitaciones que el experto geotécnico debe conocer para seleccionar el método que mejor se adapte a las exigencias del problema a evaluar. Así, las limitaciones generales de los MEL incluyen:

- Ausencia de análisis de deformaciones.
- Cálculo basado en el equilibrio estático de fuerzas, que tras la falla ya no es aplicable debido a cambios en la geometría del análisis y la iniciación del movimiento del suelo, invalidando el equilibrio estático.
- Suposición de distribución uniforme de esfuerzos en la base de los elementos o dovelas.

Por otro lado, los diferentes métodos de equilibrio límite pueden poseer otras limitaciones, tales como:

- Asunción de isotropía del material del talud.
- Consideración, o no, de fuerzas cortantes entre las dovelas.
- Enfoque en equilibrio de momentos en ciertas metodologías.
- Suposición de una superficie de falla específica.

Ante estas limitaciones inherentes a los Métodos de Equilibrio Límite y las simplificaciones de los análisis bidimensionales, los análisis de situaciones reales han alcanzado buenos resultados con éxito. Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas, se han explorado e implementado numerosos métodos tridimensionales para la evaluación de la estabilidad de taludes. El interés en los análisis tridimensionales de la estabilidad de taludes surge del hecho de que la mayoría de las fallas de este tipo poseen una naturaleza intrínsecamente tridimensional. En otras palabras, la superficie de falla con frecuencia presenta variaciones en relación con la topografía, que escapan a las previsiones del ingeniero.

De acuerdo con las condiciones del medio analizado y la información disponible, existen teorías de análisis que aplican el método de equilibrio límite para la determinación de los factores de seguridad; se puede destacar entre las teorías más utilizadas el método de Bishop, el método de GLE/Morgenstern Price, y el método de Spencer.



El método de Bishop se basa en suposiciones simplificadas, como la división del talud en bloques estáticos y la consideración de una superficie de falla potencial definida por el ángulo de fricción interna del suelo y la cohesión. Estas simplificaciones pueden llevar a resultados conservadores, ya que tienden a subestimar la estabilidad del talud.

Los métodos de GLE/Morgenstern Price y Spencer, se consideran métodos rigurosos ya que tienen en cuenta una mayor complejidad en la geometría de la superficie de falla, permiten la variación de propiedades geotécnicas dentro del talud y pueden considerar condiciones no drenadas y la interacción suelo-roca de manera más precisa.

Las diferencias en los resultados entre Bishop y los métodos GLE/Morgenstern Price y Spencer se deben a las simplificaciones y suposiciones inherentes a cada método. Bishop tiende a ser más conservador y menos preciso en situaciones donde la interacción suelo-roca es importante o donde las condiciones de drenaje y tiempo son complejas. Por lo tanto, es recomendable utilizar métodos más avanzados como GLE/Morgenstern Price y Spencer cuando se requiere un análisis más preciso de la estabilidad de taludes, especialmente en casos de taludes compuestos o condiciones geotécnicas complicadas, como es el caso de los taludes del tramo de carretera de montaña de la RN2, que en su mayoría su conformación es compuesta entre suelo y roca.

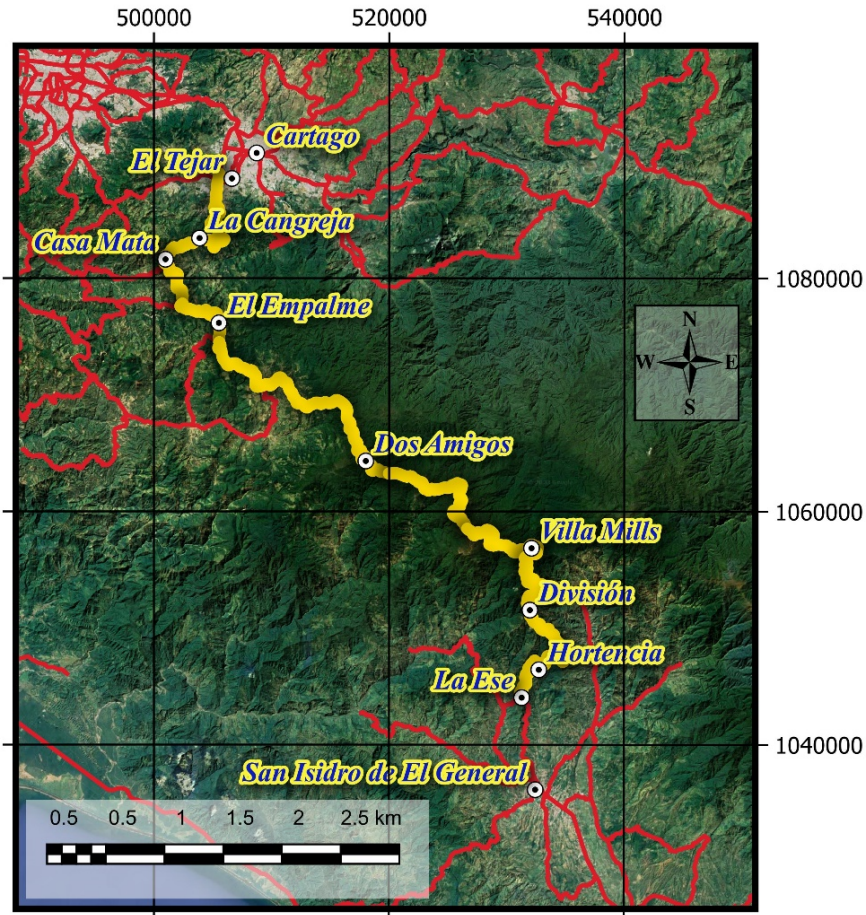
IV. Descripción general del sitio

Costa Rica se encuentra en el Trópico de Cáncer, cuya variabilidad climática se ve influenciada de acuerdo con su latitud y longitud, la presencia de la Zona de Convergencia Intertropical, la presencia de vientos alisios, la recurrencia de ciclones tropicales, entre algunos otros aspectos. En el caso de la zona de estudio, ésta se encuentra localizada entre el kilómetro 25+258 hasta el 124+885, que corresponde al tramo que se encuentre entre San Isidro del Guarco y San Isidro del General, las temperaturas varían entre 8°C (en altitudes superiores a los 2500 msnm) y 26°C, valores característicos de los terrenos que se localizan por debajo de la cota de los 1900 msnm. La precipitación promedio anual se mantiene en un rango que va desde los 2500 a 5500 mm. Específicamente, por el efecto orográfico, entre los 1000 y 2000 msnm se presentan precipitaciones entre los 4000-5500 mm de lluvia, los cuales representan las cuencas de captación de los ríos Chirripó Pacífico y Buenavista. Los valores medios de 3000-3500 mm de precipitación ocupan dos pisos de altitud: a) los flancos distales de la zona montañosa, localizada entre los 2000-3800 msnm y, b) piedemonte, entre los 700-1000 msnm. Finalmente, los sectores con altitudes menores a los 700 msnm presentan precipitaciones entre los 2500-3000 msnm, correspondiendo a la Fila Brunqueña y llanura aluvial (IMN, 2008).

La zona de estudio es una zona montañosa, escarpada con intensos procesos de meteorización y erosión superficial natural. Como se mencionó anteriormente, el tramo analizado se localiza en la Cordillera de Talamanca, en donde la mayoría del tramo se ubica en la divisoria de aguas entre las vertientes del Caribe y del Pacífico (ver Figura 1).



Figura 1. Ubicación del tramo evaluado



Proyecto: Evaluación de la condición de los taludes a lo largo de la carretera de montaña, Ruta Nacional 2

Descripción: Ubicación del tramo evaluado, comprendido en la Ruta Nacional 2 entre los estacionamientos 25+258 al 124+885

Fuente: Programa de Ingeniería Geotécnica, LanammeUCR



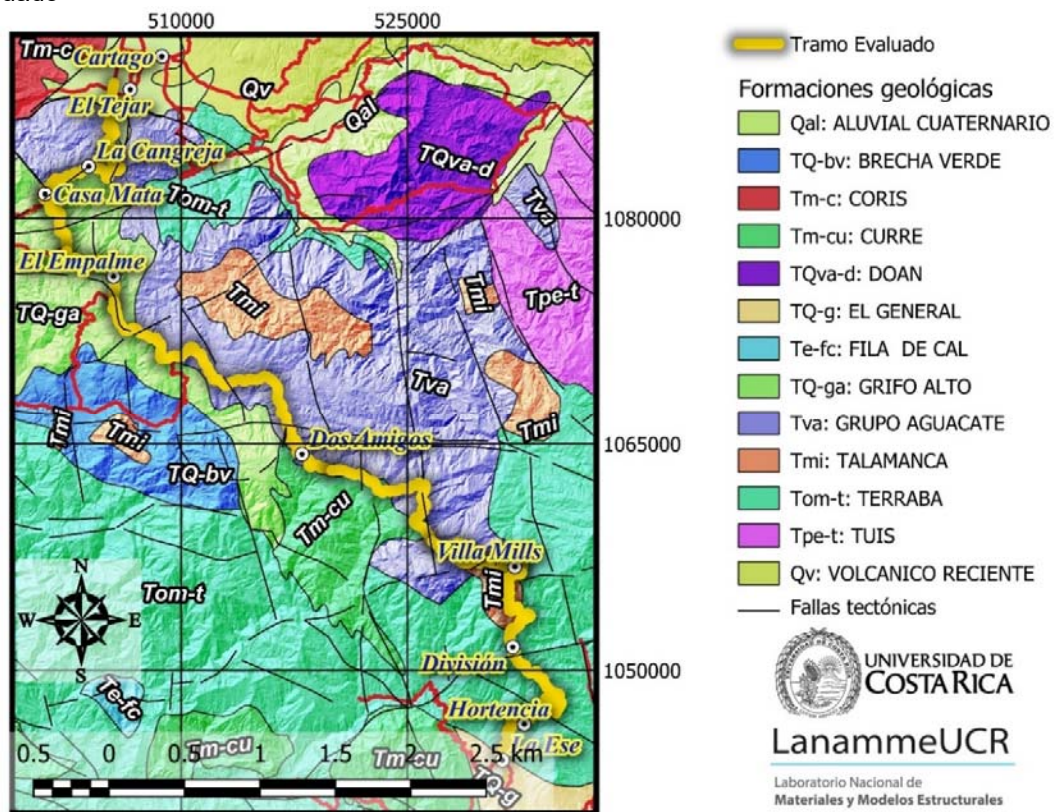
Según Ruiz *et al.* (2021), geomorfológicamente, la zona de estudio asociada a la carretera corresponde con laderas denudacionales de origen volcánico, sedimentario intrusivo y metamórfico de contacto. Con ladera montañosas con pendientes moderadas a fuertes (>16-55°) producto de la meteorización y erosión intensa que se ha dado en las rocas.

IV.1 Geología local de la zona

Los suelos en el área de estudio presentan una geología variada y deben su material parental a rocas ígneas (granitos y andesitas) y sedimentarias (lutitas, areniscas y conglomerados) del Mioceno; así como a depósitos del Plio-Pleistoceno y el Cuaternario que conforman el piedemonte y la llanura aluvial.

Específicamente, la zona de estudio se muestra en la Figura 2, donde se observa la variedad geológica de los materiales que afloran en las inmediaciones de la carretera.

Figura 2. Mapa geológico de formaciones y rocas asociadas a la ruta nacional 2, en el tramo evaluado



Las formaciones y rocas asociadas se describen a continuación con base en las descripciones de Denyer y Kussmaul (2000):

- **Aluvial cuaternario (Qal):** Esta región se encuentra entre los estacionamientos 25+258 al 27+050, entre la intersección de Tejar del Guarco y San Isidro del Guarco. Esta región corresponde a parte de la depresión del Valle Central en medio de dos arcos volcánicos que comenzó a rellenarse con productos aluviales, lahares y otros flujos volcánicos, lo cual le confiere una alta heterogeneidad de los materiales presentes.
- **Grupo Aguacate (Tva):** Compuesto en su mayor parte por lavas basálticas y andesíticas, depósitos de flujos piroclásticos, brechas, tobas y sedimentos vulcanoclásticos, cortado por pequeños cuerpos intrusivos y extrusivos y diques basálticos. La mayoría de las rocas están muy alteradas hidrotermalmente y en varios lugares se encuentran mineralizaciones de oro. Conforme a la Figura 2, se encuentran afloramientos entre los estacionamientos 27+050 al 35+485, 37+070 al 39+625, 55+865 al 78+500 y del 81+900 al 93+800.



- **Formación Grifo Alto (TQ-ga):** La cual corresponde a una secuencia de lavas y rocas piroclásticas. Específicamente, se trata de lavas basálticas, andesita-basálticas y tefríticas que muchas veces contienen fenocristales bien formados de augita con tamaños de hasta 1 cm, pocos fenocristales de plagioclasa, olivino alterado y magnetita. A veces también se encuentran lavas con grandes fenocristales de hornblenda. Se presenta predominancia de las andesitas con fenocristales de plagioclasa y una matriz oscura con alto grado de meteorización. Los afloramientos se encuentran entre los estacionamientos 35+485 al 37+070 y del 39+625 al 55+865.
- **Formación Curré (Tm-cu):** Esta unidad se compone de areniscas pardas, de granulometría media, estratificadas en capas de mediano espesor, con intercalaciones menores de conglomerados y lutitas; toda la secuencia presenta materiales tobáceos o detritos derivados de rocas volcánicas. Los afloramientos de estos materiales se encuentran entre los estacionamientos 78+500 al 81+900, aproximadamente.
- **Intrusivos de la cordillera de Talamanca (Tmi):** Estos materiales afloran entre el estacionamiento 93+800 al 104+000, los cuales pueden presentar alteración hidrotermal, también arenitización y con poco desarrollo de suelos residuales con un espesor menor a 1m, donde la roca madre se encuentra muy alterada y gran profundidad. Está constituido fundamentalmente por monzonitas cuarzosas, monzonitas, monzodioritas o monzogabros, granitos y granodioritas hacia los flancos de las cordilleras
- **Formación Térraba (Tom-t):** Consiste en una secuencia compuesta por lutitas, limolitas y areniscas calcáreas de color gris oscuro a negro. Las rocas predominantes son conglomerados y areniscas, además de depósitos de canales turbidíticos. Son comunes estructuras sedimentarias tales como laminaciones cruzadas, ondulitas, cargas, bolas de arcilla, pliegues de convolución y estratos con gradación positiva, carbón y otros restos de fósiles y icnofósiles. Estos materiales afloran entre el estacionamiento 104+000 al 124+885.

V. Resultados

Con el objetivo de identificar y caracterizar los taludes con indicios de inestabilidad a lo largo del tramo analizado, se realiza la evaluación y caracterización de los taludes registrados durante diferentes visitas de campo utilizando la herramienta de evaluación de taludes en carretera diseñada por el PIG. Esto conforma una base de datos que con el paso de los años permitirá monitorear e identificar las zonas con deslizamientos recurrentes. La herramienta da resultados que luego deben ser evaluados por el profesional especialista en geotecnia, quien seleccionará los sitios que requieran un análisis de estabilidad más exhaustivo, basado en criterios técnicos fundamentados. Para esto se utilizan software especializados que generan modelos representativos del sitio específico tomando en consideración las propiedades geotécnicas del suelo, y a través de estos, se obtienen factores de seguridad que son comparados con lo indicado en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica.

V.1 Aplicación de la herramienta para la evaluación de la condición de taludes

Con la finalidad de evaluar la condición y contar con un inventario de los taludes que presentan indicios de inestabilidad a lo largo del sector de carretera de montaña de la RN 2, se utilizó la herramienta bajo la metodología descrita en apartados anteriores. A continuación, en las Figura 3 a la Figura 8 se muestran un resumen de la aplicación de la herramienta de evaluación de la condición de taludes en los sitios identificados con evidencia de inestabilidad entre el estacionamiento 25+258 hasta el 124+885. En total se evaluaron 6 sitios con evidencias de inestabilidad importantes en el talud, de los cuales 1 se conforma de material rocoso y los otros 5 de material suelto, compuesto por una matriz de suelo.

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 18 de 38
-----------------------------------	-------------------	-----------------



Figura 3. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.7385102, -83.954189 (48+800)

Fotografía	Caracterización										Clasificación	
	Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Naturaleza del material	Vegetación	Uso del suelo		
	9.7385102/ -83.954189	Menos de 2000 mm	85	Escarpado	30	Compuesto (primordialmente suelo)	Altamente agrietado	Cohesivo	Arbustos	Camino/carretera	Alta - Requiere análisis profundo según condición del talud	
	Condición del talud					Evidencia de movimiento						
	Falla en el talud	Manejo de escorrentía	Forma del talud	Presencia de agua en el talud	Flujo de agua en el talud	Árboles inclinados	Formación de coronas	Levantamiento al pie del Talud	Material caído	Grietas en el terreno		Grietas en la carretera
	Deslizamiento rotacional	No	Cóncava	A media altura	Sin flujo	Si	Si	No	No	No		
	Estructuras cercanas					Redes y Puentes						
	Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal			
No hay	No	Si	Arterial	No	No	No	No	No				

Figura 4. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.5320084, -83.7106293 (102+835)

Fotografía	Caracterización										Clasificación	
	Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Naturaleza del material	Vegetación	Uso del suelo		
	9.5320084/ -83.7106293	4500 mm - 5500 mm	80	Escarpado	200	Compuesto (primordialmente suelo)	Sin grietas	Friccionante	Bosque primario	Camino/carretera	Alta - Requiere análisis profundo según condición del talud	
	Condición del talud					Evidencia de movimiento						
	Falla en el talud	Manejo de escorrentía	Forma del talud	Presencia de agua en el talud	Flujo de agua en el talud	Árboles inclinados	Formación de coronas	Levantamiento al pie del Talud	Material caído	Grietas en el terreno		
	Deslizamiento traslacional	No	Rectilínea	A media altura	Sin flujo	Si	No	No	No	No		
	Estructuras cercanas					Redes y Puentes						
	Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal			
No hay	No	Si	Arterial	No	No	No	No	No				



Figura 5. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.529293, -83.7022765 (104+250)

Fotografía	Caracterización										Clasificación	
	Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Naturaleza del material	Vegetación	Uso del suelo		
	9.529293/ -83.7022765	3000 mm - 4500 mm	80	Escarpado	70	Compuesto (primordialmente suelo)	Medianamente agrietado	Ambos	Ninguna	Camino/carretera	Media - Evaluación específica del sitio	
	Condición del talud					Evidencia de movimiento						
	Falla en el talud	Manejo de escorrentía	Forma del talud	Presencia de agua en el talud	Flujo de agua en el talud	Árboles inclinados	Formación de coronas	Levantamiento al pie del Talud	Material caído	Grietas en el terreno		Grietas alrededor del talud
	Deslizamiento traslacional	No	Compuesta	No	Sin flujo	No	Si	No	No			
	Estructuras cercanas					Redes y Puentes						
	Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal			
En buen estado	No	Si	Arterial	No	No	No	No	No				

Figura 6. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.5262367, -83.7024169 (105+375)

Fotografía	Caracterización										Clasificación	
	Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Discontinuidad en la roca	Vegetación	Uso del suelo		
	9.5262367/ -83.7024169	3000 mm - 4500 mm	80	Escarpado	95	Roca fracturada	Medianamente fracturado	Discontinuidad sin relleno	Bosque primario	Camino/carretera	Media - Evaluación específica del sitio	
	Condición del talud					Evidencia de movimiento						
	Falla en el talud	Manejo de escorrentía	Forma del talud	Presencia de agua en el talud	Flujo de agua en el talud	Árboles inclinados	Formación de coronas	Levantamiento al pie del Talud	Material caído	Grietas en el terreno		No
	No	No	Rectilínea	Seco	Sin flujo	Si	No	No	No			
	Estructuras cercanas					Redes y Puentes						
	Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal			
No hay	No	Si	Arterial	No	No	No	No	No				



Figura 7. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.483692, -83.685668 (112+820)

Fotografía	Caracterización										Clasificación
	Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Naturaleza del material	Vegetación	Uso del suelo	
	9.483692/ -83.685668	4500 mm - 5500 mm	80	Escarpado	60	Compuesto (primordialmente suelo)	Fallado	Cohesivo	Bosque primario	Camino/carretera	Media - Evaluación específica del sitio
	Condición del talud					Evidencia de movimiento					
	Falla en el talud	Manejo de escorrentía	Forma del talud	Presencia de agua en el talud	Flujo de agua en el talud	Árboles inclinados	Formación de coronas	Levantamiento al pie del Talud	Material caído	Grietas en el terreno	
	Deslizamiento rotacional	No	Cóncava	No	Sin flujo	No	Si	No	No	Grietas alrededor del talud	
	Estructuras cercanas					Redes y Puentes					
	Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal		
	No hay	No	Si	Arterial	No	Si	No	No	No		

Figura 8. Resultado de evaluación del talud de suelo ubicado en las coordenadas 9.4740569, -83.6935618 (117+775)

Fotografía	Caracterización										Clasificación
	Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Naturaleza del material	Vegetación	Uso del suelo	
	9.4740569/ -83.6935618	3000 mm - 4500 mm	70	Escarpado	100	Compuesto (primordialmente suelo)	Fallado	Ambos	Pastos Naturales	Camino/carretera	Media - Evaluación específica del sitio
	Condición del talud					Evidencia de movimiento					
	Falla en el talud	Manejo de escorrentía	Forma del talud	Presencia de agua en el talud	Flujo de agua en el talud	Árboles inclinados	Formación de coronas	Levantamiento al pie del Talud	Material caído	Grietas en el terreno	
	Flujo de detritos	No	Compuesta	A media altura	Sin flujo	No	Si	No	No	Grietas alrededor del talud	
	Estructuras cercanas					Redes y Puentes					
	Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal		
	En buen estado	No	Si	Arterial	No	No	No	No	No		



Como resultado de la aplicación de la herramienta y el uso de la “Guía para el uso de la herramienta para evaluación de condición de taludes”, la condición actual de los taludes un total de 4 sitios arrojaron una condición de susceptibilidad media ante posibles deslizamientos, y por lo tanto se recomienda que profesionales especializados en geotecnia evalúen la conveniencia de determinar la necesidad de realizar análisis más específicos en estos sitios y con ello emitir recomendaciones. Finalmente, solamente 2 taludes presentan condiciones que lo califican con susceptibilidad alta ante posibles deslizamientos y que obligatoriamente debe ser analizado por profesionales especialistas en el área de geotecnia. Es por ello, que el PIG del LanammeUCR realiza el análisis de estos taludes considerando aspectos de interés geotécnico que se detallan más adelante.

Aunado a esto, se implementó una simplificación de la herramienta de evaluación de la condición de los taludes en carretera que consiste en un levantamiento rápido para el cual se almacena únicamente la fecha del levantamiento, coordenadas exactas del sitio y una fotografía de la condición. La herramienta simplificada surge a raíz de la limitación de algunas zonas de las carreteras de montaña en cuanto a espacios disponibles para estacionar el vehículo sin obstruir el flujo del tránsito, sin poner en riesgo la vida de los operarios de las evaluaciones y de los usuarios de la carretera. Con esta otra herramienta es posible identificar sitios con evidencias de inestabilidad que puedan evolucionar a movimientos de material que eventualmente afecten la carretera al cambiar sus condiciones geométricas o de saturación del medio. En la Tabla 4 se enlistan las ubicaciones y fechas de los registros de sitios identificados con condiciones que son consideradas evidencias de inestabilidad, en total se registraron 52 taludes con esta herramienta simplificada, y en la Figura 9 se muestran con una cruz roja los sitios registrados con la herramienta simplificada y con círculo celeste los sitios evaluados con la herramienta de evaluación de taludes en carreta del PIG del LanammeUCR.

Tabla 4. Ubicación de los sitios identificados con la herramienta rápida

#	Fecha	Ubicación		Estacio_ namiento	#	Fecha	Ubicación		Estacio_ namiento
		Este	Norte				Este	Norte	
1	07/11/23	505306,21	1085976,44	28+512	27	18/10/22	532434,15	1052967,40	105+910
2	20/09/23	505272,34	1085443,52	29+581	28	01/09/23	532194,75	1052810,60	106+221
3	07/11/23	505487,30	1084358,29	31+599	29	07/11/23	531960,04	1052788,68	106+512
4	07/11/23	505447,86	1083190,25	33+851	30	18/10/22	531807,79	1052377,10	106+989
5	07/11/23	502495,81	1082851,18	37+819	31	07/11/23	531769,65	1052025,92	107+377
6	07/11/23	502084,95	1079153,32	43+626	32	07/11/23	531995,93	1051181,84	108+507
7	07/11/23	504326,18	1077172,48	47+802	33	18/10/22	532867,46	1050062,77	110+222
8	18/10/22	505496,71	1076504,44	50+141	34	18/10/22	533656,86	1049626,39	111+408
9	07/11/23	506296,20	1072524,09	54+728	35	07/11/23	533694,10	1049591,27	111+458
10	07/11/23	516887,38	1066918,92	70+862	36	07/11/23	534044,46	1049230,26	112+039
11	07/11/23	525596,70	1062255,57	83+756	37	07/11/23	534038,64	1049210,56	112+058
12	07/11/23	526129,26	1061907,58	84+826	38	01/09/23	534211,10	1048877,89	112+441
13	07/11/23	531904,99	1056217,72	99+653	39	18/10/22	534469,42	1048673,87	112+775
14	18/10/22	531781,66	1056159,17	99+793	40	07/11/23	534500,02	1048662,25	112+807
15	07/11/23	531765,45	1055599,49	100+561	41	07/11/23	534513,20	1048658,77	112+820
16	01/09/23	531541,41	1055435,61	100+864	42	07/11/23	534707,31	1048488,79	113+101
17	07/11/23	531635,15	1055312,95	101+015	43	18/10/22	535193,70	1047869,84	114+088
18	18/10/22	531750,62	1054696,88	102+006	44	07/11/23	535201,09	1047852,37	114+107
19	18/10/22	531747,23	1054191,73	102+556	45	18/10/22	534719,90	1047519,04	115+533
20	01/09/23	532320,51	1054176,65	103+524	46	07/11/23	534676,03	1047637,91	115+688
21	07/11/23	532331,59	1054145,36	103+559	47	07/11/23	534323,37	1048181,30	116+514
22	18/10/22	532488,97	1053783,31	103+968	48	07/11/23	534307,08	1048180,77	116+532
23	01/09/23	533140,41	1053577,74	104+789	49	18/10/22	534157,87	1048133,90	116+721
24	01/09/23	532992,65	1053533,50	104+964	50	18/10/22	533492,97	1047612,22	117+894
25	18/10/22	532551,21	1053305,13	105+485	51	01/09/23	532339,45	1047176,13	120+904
26	18/10/22	532455,04	1053290,49	105+583	52	18/10/22	531897,84	1046621,66	121+713

Figura 9. Ubicación gráfica del inventario de taludes con evidencias de inestabilidad a lo largo del tramo de carretera de montaña de la RN2



V.2 Estabilidad de taludes de sitios específicos

Actualmente, la mayoría de los estudios de estabilidad de taludes se basan en los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), donde se considera la relación de fuerzas deslizantes y fuerzas resistentes a lo largo de una superficie de falla dada. Se utilizan tres ecuaciones de equilibrio de fuerzas horizontales, equilibrio de fuerzas verticales y equilibrio de momentos. Algunos de estos métodos utilizan dovelas con una o dos ecuaciones de equilibrio haciendo la solución “no rigurosa”. Sin importar el procedimiento empleado para resolver el sistema de ecuaciones en los métodos de equilibrio límite, existirán más incógnitas que número de ecuaciones de equilibrio, haciendo de la solución de la estabilidad un problema estáticamente indeterminado.

Los métodos “rigurosos”, son aquellos que satisfacen las tres ecuaciones de equilibrio, como el método de Spencer y de Morgenstern y Price. Para el caso en el que la superficie de falla sea circular,



el método Simplificado de Bishop produce valores del factor de seguridad que están en correspondencia con los métodos rigurosos, a pesar de que emplea únicamente dos ecuaciones de equilibrio (fuerzas verticales y momentos).

Al hacer uso de estas metodologías de análisis es importante tener en consideración que, existen limitaciones propias de cada método, las cuales deben ser tomadas en cuenta a la hora de elegir el método que mejor responda a las condiciones específicas del sitio de análisis. 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.

El objetivo de este análisis de estabilidad es obtener de manera preliminar 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 alto y el riesgo de daños económicos y ambientales en un nivel alto, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,50 en condición estática. Para la condición de sismo (pseudo-estática) se utiliza 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 S1 - S2, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,10.

No obstante, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos ya que, la información disponible en cuanto a las propiedades geotécnicas de los materiales es limitada y se debe realizar una exploración geotécnica exhaustiva para obtener un modelo geotécnico cuyos parámetros mecánicos tengan una mayor representatividad. Sin embargo, este análisis preliminar puede constituir un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos, pues puede mostrar los sitios de la RN2 en que la Administración concentre sus esfuerzos.

Para determinar los sitios que se analizaran de manera más detallada, se realizó una valoración por parte del equipo de ingenieros del PIG del LanammeUCR respecto a los resultados obtenidos con las herramientas descritas en el apartado anterior. Se tomaron en consideración aspectos como altura del talud, pendiente, presencia de agua en el talud, y evidencias de movimiento. En la

Tabla 5 se enlistan los sitios que por su condición y clasificación se decidió evaluar la estabilidad ante deslizamientos, tomando en consideración condiciones de saturación y sismo.

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 24 de 38
-----------------------------------	-------------------	-----------------



Tabla 5. Taludes analizados con el método de equilibrio límite (MEL)

Modelo	Latitud	Longitud	Ver
Nº1	9,7385102	-83,9541890	Figura 3
Nº2	9,5320084	-83,7106293	Figura 4
Nº3	9,5253367	-83,7024169	Figura 6
Nº4	9,4740569	-83,6935618	Figura 8

En el análisis específico para el modelo N°3, concerniente al estacionamiento 105+375, el cual corresponde con un sitio en el que ocurrió un deslizamiento que ocasionó en su momento el cierre del tránsito. Durante la visita por parte del equipo de profesionales del PIG del LanammeUCR fue posible identificar de manera general la conformación del talud por un macizo rocoso altamente fracturado. Por lo cual, se recolectó un bloque de roca que conformaba la estructura principal del talud para realizar ensayos de laboratorio particulares. Cabe destacar que es posible encontrar otros materiales en dicho talud, sin embargo, para este análisis preliminar se supone un modelo simple conformado únicamente por el macizo rocoso fracturado. Para ello se utilizó la clasificación del macizo rocoso utilizando 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 1:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

donde:

σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales mayor y menor, respectivamente, en la ruptura

σ_{ci} es la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa

m , s y α dependen de las propiedades y características del macizo rocoso y que se definen por las ecuaciones 2, 3 y 4:

$$m = m_i \exp \frac{GSI - 100}{28} \quad (2)$$

donde m_i es el valor correspondiente a la matriz rocosa, que se obtiene en ensayos de compresión triaxial. La Tabla 6 muestra los valores típicos para diferentes tipos de roca que pueden utilizarse.

Tabla 6. 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

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

$$s = \exp \frac{GSI-100}{9} \quad \alpha = 0,5 \quad (3)$$

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

$$s = 0 \quad \alpha = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad (4)$$

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:

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

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 10. De esta manera, a partir de la visita en campo fue posible realizar una evaluación de la condición del macizo rocoso, donde se determinó una estructura perturbada, con bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Por su parte, las discontinuidades presentan una condición muy mala, con superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos arcillosos (ver Figura 11). De forma tal, que se puede estimar un valor promedio del GSI en un rango entre 25 y 15, por lo cual, para efectos de los análisis se empleó un valor de **GSI igual a 20**.

Como se mencionó anteriormente, la región donde se encuentra este talud pertenece a la formación Térraba, donde las rocas predominantes corresponden a areniscas y conglomerados, por lo que según lo observado en la Tabla 6, corresponde un valor de **$m_i = 20$** .

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 o imprecisos. Así pues, debido a lo observado en sitio 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 conservador de **$D=1,0$** .

Figura 10. Caracterización de un macizo rocoso fracturado en función de la trabazón del macizo y las condiciones de sus discontinuidades

<p>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA ROCAS FRACTURADAS (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
		DECRECE LAS CONDICIONES SUPERFICIALES →				
<p>INTACTA O MASIVA. Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas. Esp. 100cm</p>	150	90			N/A	N/A
<p>BLOCOSA. Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades. Esp. 30cm</p>	80	80	70			
<p>MUY BLOCOSA. Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades. Esp. 10cm</p>	40	60	50			
<p>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación o esquistocidad. Esp. 3cm</p>	20		40		30	
<p>DESINTEGRADA. Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados Esp. 1cm</p>	5				20	
<p>LAMINADA/ CIZALLADA. Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistocidad o planos de cizalla</p>	2	N/A	N/A			10
		DISMINUYE LA TRABAZÓN DE LAS PIEZAS DE ROCA ↓				



Figura 11. Condición del macizo rocoso observado en las proximidades del km 105+375 de la RN 2



Finalmente, de las muestras de roca recolectadas se realizó la determinación en laboratorio de su resistencia a la compresión confinada, de acuerdo con la norma ASTM D7012 “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 de los ensayos realizados a las muestras de roca se encuentran en el informe EIC-Lanamme-INF-1321-2023, con los que se estimó un valor promedio de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, UCS (*uniaxial compressive strength*) de **UCS = 123380 kPa** y un peso unitario de la roca de **$\gamma = 26.55 \text{ kN/m}^3$** .

Por su parte, en el caso de los modelos N°1, N°2 y N°4, para los análisis preliminares que se presentan a continuación, se utilizaron parámetros y propiedades obtenidas a partir de la aplicación del criterio experto de los ingenieros del PIG basados en la caracterización geológica y ubicación de los puntos de análisis. Para ello, partiendo de los estacionamientos, la geología de la zona y conforme a los valores sugeridos por Lukic (2018) se utilizaron los parámetros que se muestran en

Informe EIC-Lanamme-INF-1708-2023	Diciembre de 2023	Página 28 de 38
-----------------------------------	-------------------	-----------------



la **Tabla 7**. Estos valores se consideran conservadores y válidos para análisis preliminares, no obstante, análisis específicos de las condiciones de estos sitios requieren de campañas de exploración geotécnicas suficientes y adecuadas definidas por el ingeniero geotecnista responsable del diseño que asigne la Administración.

Tabla 7. Propiedades de los materiales a utilizar en los análisis de estabilidad

Modelo	Caracterización geológica	Materiales predominantes	Peso unitario (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción
N°1	TQ-ga Grifo Alto	Lavas basálticas, andesitas	16,0	45,0	30,0
N°2	Tmi Talamanca	Monzonitas, monzodioritas, granodioritas	16,0	67,0	32,0
N°4	Tom-t Térraba	Conglomerados y areniscas	16,0	67,0	32,0

V.3 Resultados utilizando el método de equilibrio límite MEL en sitios específicos

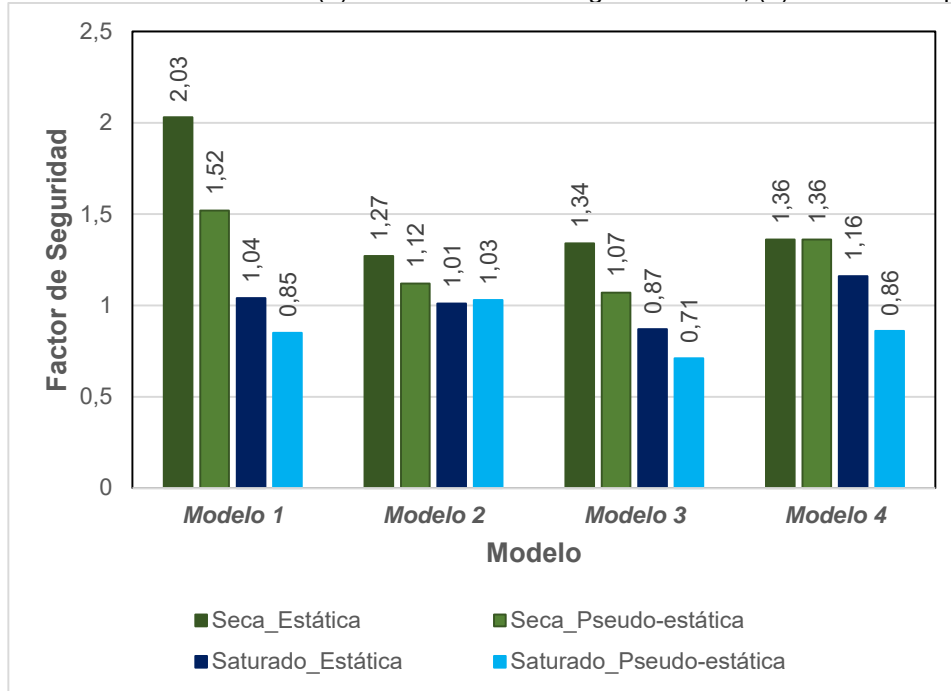
Teniendo en consideración los sitios de análisis de estabilidad de taludes en la RN2, se utilizaron los Modelos de Elevación Digital (MED) obtenidos con ayuda del VANT, los parámetros y propiedades de los materiales mencionados anteriormente, y el uso de softwares especializados, para llevar a cabo un análisis de estabilidad de taludes, se obtuvieron los resultados de factores de seguridad de la Tabla 8 y la Figura 12. Para estos análisis fueron evaluadas las condiciones de talud seco y una condición en la que el material que conforma los taludes se encuentra con condiciones de saturación crítica. Para ambas condiciones se evaluó la respuesta de los taludes ande carga estática y pseudo estática.

Tabla 8. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en los diferentes sitios analizados

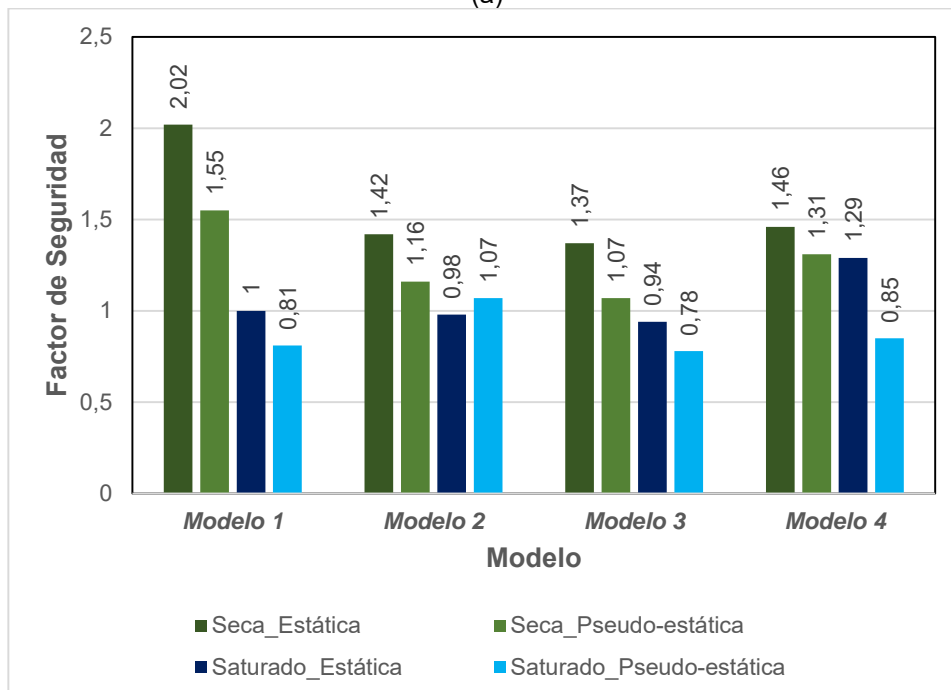
Modelo	Condición	Método de análisis		CGTLCR	
		GLE/Morgenstern Price	Spencer		
Estática	Seca	1	2,03	2,02	1,50
		2	1,27	1,42	
		3	1,34	1,37	
		4	1,36	1,46	
	Saturado	1	1,04	1,00	
		2	1,01	0,98	
		3	0,87	0,94	
		4	1,16	1,29	
Pseudo-estática	Seca	1	1,52	1,55	1,10
		2	1,12	1,16	
		3	1,07	1,07	
		4	1,36	1,31	
	Saturado	1	0,85	0,81	
		2	1,03	1,07	
		3	0,71	0,78	
		4	0,86	0,85	



Figura 12. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en los diferentes sitios analizados: (a) método de GLE/Morgestern-Price, (b) método de Spencer



(a)





(b)

Como se puede observar en la Tabla 8, se resaltan en rojo los factores de seguridad que son inferiores a los valores mínimos recomendados por el CGTLCR. Para los casos de análisis en los que el factor de seguridad obtenido es cercano a 1, se considera que el talud bajo las condiciones supuestas se encuentra en equilibrio límite, lo cual se corrobora por lo observado en sitio cuando se realizaron las respectivas evaluaciones. Esto implica que, cualquier variación de las condiciones del terreno podría eventualmente ocasionar alguna inestabilidad en el medio. Se considera para estos casos que el desempeño desde el punto de vista del método de equilibrio límite es inadecuado, bajo la composición y condiciones de análisis supuestas en este informe. Por su parte, en el caso de los valores de factores de seguridad inferiores a 0,87, éstos representarían que los taludes se encuentran en una condición fallada, no obstante de la visita de campo, se observó que estos taludes aún se encuentran en una condición de equilibrio límite, lo cual se puede justificar por los valores de las propiedades mecánicas utilizados en las simulaciones, los cuales, según se indicó anteriormente, son valores que se consideraron conservadores y válidos para análisis preliminares y que por lo tanto, se requieren campañas de exploración geotécnicas adecuadas para los análisis específicos de las condiciones de estos sitios.

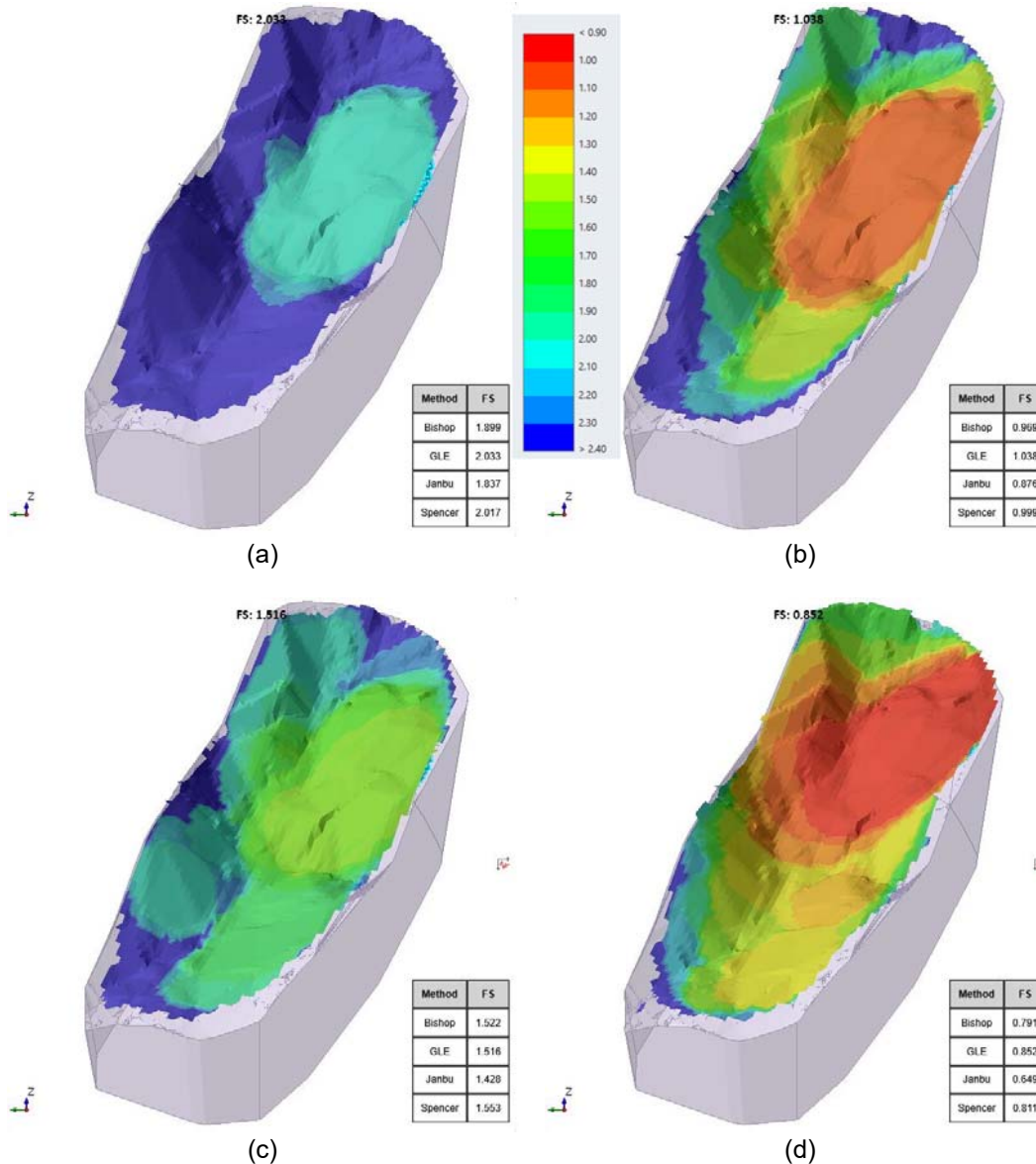
Es importante resaltar que los factores de seguridad obtenidos cuando se considera la condición saturada muestran una reducción significativa en los valores obtenidos en las simulaciones. Lo cual corresponde al comportamiento esperado, es decir, cuando se aplica el principio de los esfuerzos efectivos y se analiza en una condición no drenada, el incremento en el nivel del agua conlleva a un aumento de las cargas presentes en el interior del talud, el cual se transfiere directamente a un incremento de la presión de poros y, por consiguiente, a una reducción en los esfuerzos efectivos, los cuales rigen el comportamiento de los suelos y que se refleja en una disminución de la resistencia al corte. Esta afectación evidentemente se ve incrementada durante la época lluviosa, cuando hay un mayor aporte de agua.

Por su parte, al analizar las condiciones con carga dinámica, se observa una disminución de los factores de seguridad al incluir la consideración de la carga sísmica.

A continuación, se muestran los mapas de distribución del factor de seguridad en las superficies de falla de cada talud analizado con la metodología de equilibrio límite y los comentarios específicos para cada uno de los taludes analizados.

En el caso del modelo N°1, que corresponde al talud de relleno del estacionamiento 48+800, la Figura 13 muestra los resultados obtenidos, donde se puede observar que, en las condiciones secas, tanto en los análisis estáticos como pseudo-estáticos, se presentan valores adecuados por encima de los mínimos recomendados por el CGTLCR. Sin embargo, cuando se considera la presencia del agua o saturación del material presente en el talud, se presentan incumplimientos de los valores mínimos requeridos por el CGTLCR. Si bien el talud se estima estable, se considera apropiado implementar medidas que favorezcan la estabilidad del talud, como lo es el manejo de aguas de escorrentía superficial, así como realizar los análisis tomando en consideración los parámetros geomecánicas específicos del sitio.

Figura 13. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 1 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático

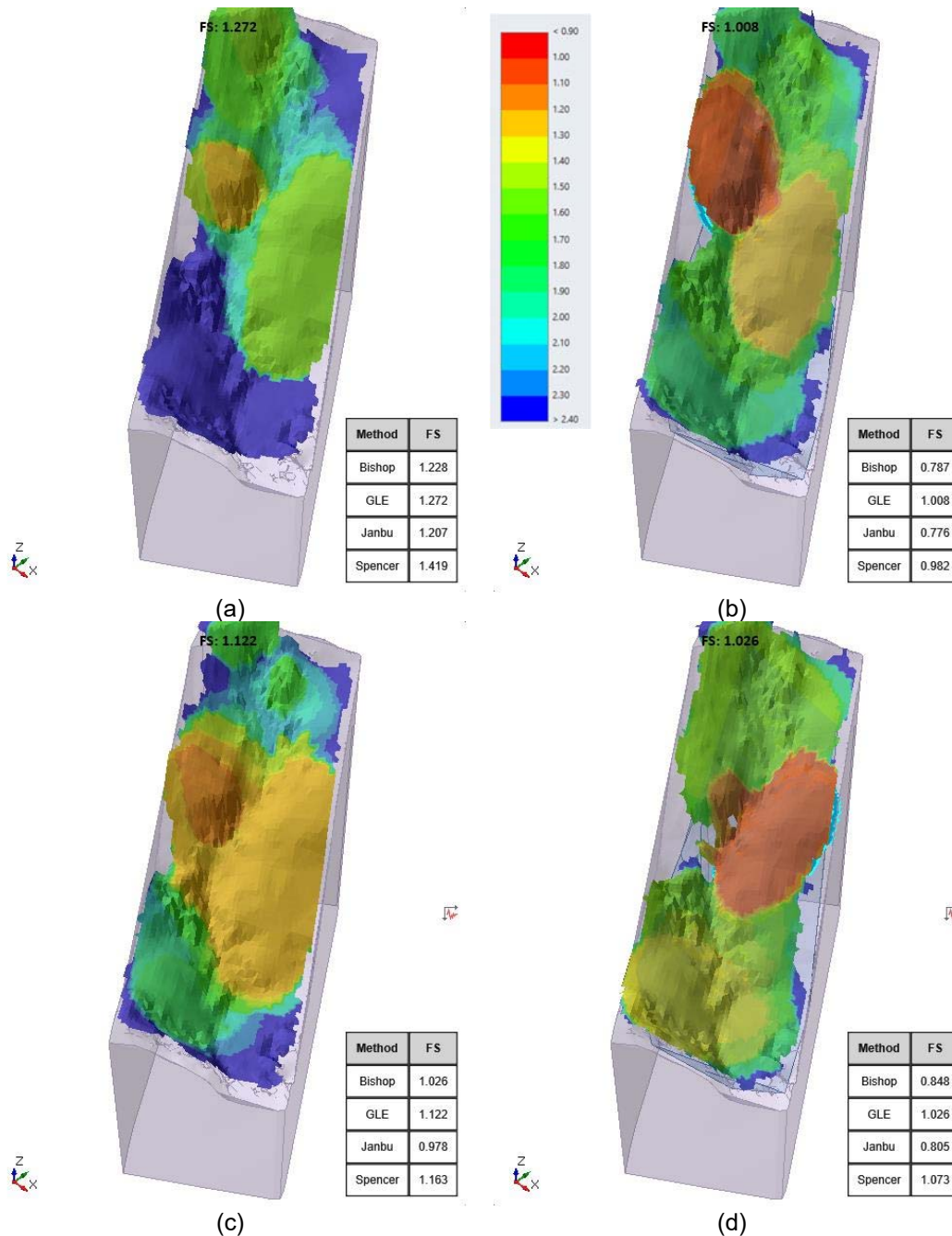


En el caso del modelo N°2, que corresponde al talud de corte del estacionamiento 102+835, los resultados obtenidos muestran que los valores obtenidos de los factores de seguridad se encuentran muy próximos o por debajo de los mínimos recomendados por el CGTLCR (ver Figura 14), tanto en las condiciones secas como saturadas, tanto en los análisis estáticos y pseudo-estáticos. Debido a lo anterior se sugiere realizar un monitoreo constante de la condición talud, especialmente cuando se tiene en consideración la condición saturada, puesto que los resultados se encuentran próximos a la condición del estado límite. Para este talud se considera apropiado implementar medidas para



el manejo de aguas de escorrentía superficial, así como realizar los análisis tomando en consideración los parámetros geomecánicos específicos del sitio.

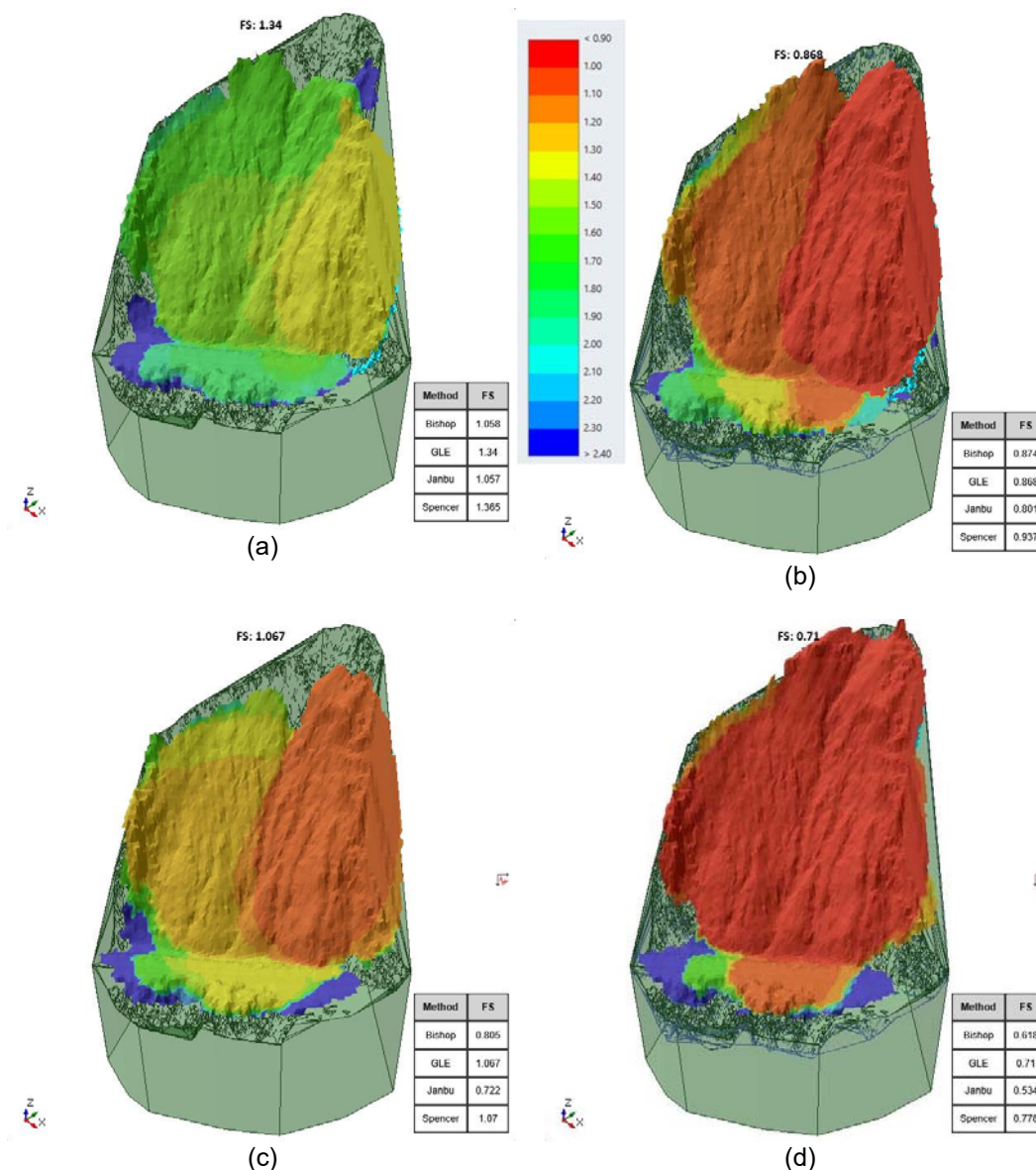
Figura 14. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 2 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático





Para el talud del estacionamiento 105+375, el cual corresponde al modelo N°3, los resultados que se presentan en la Tabla 8 y se muestran en la Figura 15. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 3 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático. Figura 15, indican que en ninguna de las condiciones consideradas en los análisis cumple con los valores mínimos recomendados por el CGTLCR.

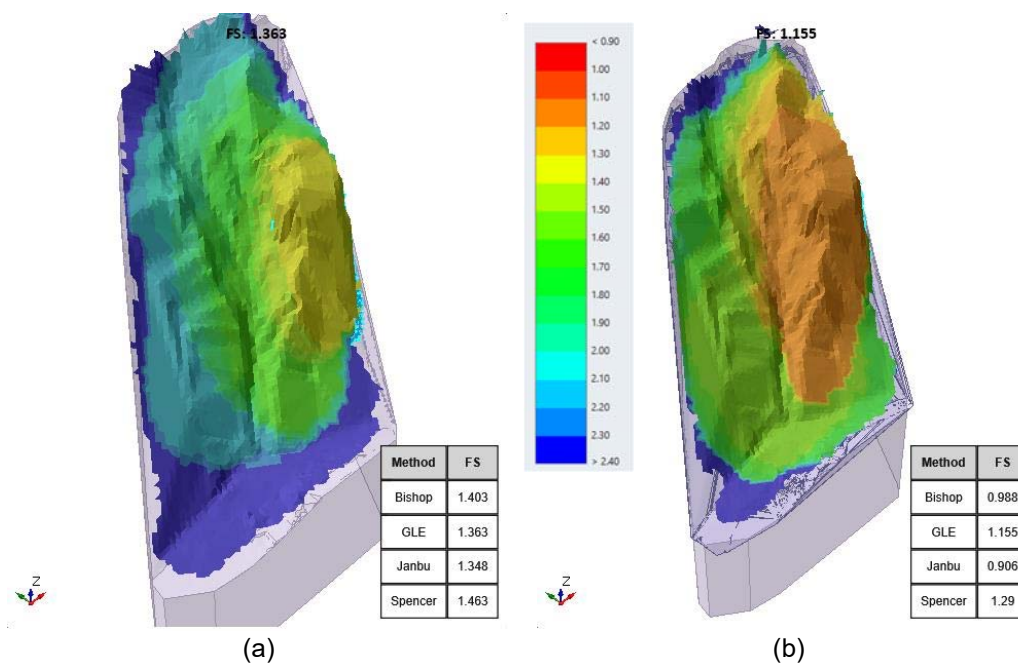
Figura 15. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 3 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático

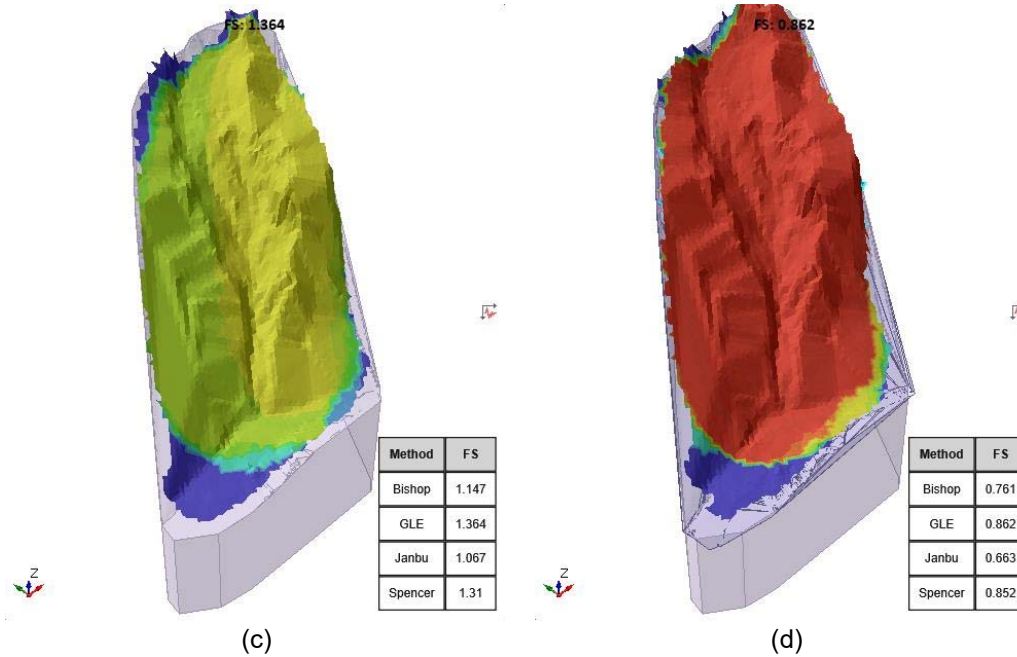




Particularmente se destaca la sensibilidad que presenta el modelo N°3 ante condiciones de saturación, donde se observan reducciones considerables en los valores de los factores de seguridad. Es necesario destacar que, en la visita de campo, fue posible observar que este talud carece de sistemas de drenaje superficial y control de la escorrentía superficial, ambos aspectos se consideran de alta importancia ante la falta de protección superficial de la cara del talud observada en sitio.

Figura 16. Factores de seguridad obtenidos en el modelo 4 utilizando el método de GLE/Morgenstern-Price para diferentes condiciones: (a) Seco estático; (b) Saturado estático; (c) Seco pseudo-estático; (d) Saturado pseudo-estático





Finalmente, en el modelo N°4, correspondiente al estacionamiento 117+775, los resultados mostrados en la Tabla 8 y la Figura 16, al igual que el caso anterior, en ninguna de las condiciones tanto secas como saturadas, en condición estática y pseudo-estática, cumple con los valores mínimos recomendados por el CGTLCR. Nuevamente, se pueden apreciar reducciones significativas en los valores de los factores de seguridad cuando se considera la condición saturada. Una vez más, no fueron observados en este talud la presencia de sistemas de drenaje superficial y control de la escorrentía superficial.

VI. Comentarios Finales

Dadas las limitaciones de la exploración geotécnica de los sitios específicos analizados en este informe, los resultados presentados no representan los resultados definitivos para la toma de decisiones o bien para la emisión de recomendaciones y diseños detallados de alguna obra de retención. Así pues, corresponde a la Administración la designación de un profesional en geotécnica para la elaboración de un estudio completo y la emisión de las propuestas de las obras de estabilidad o retención de talud, en caso de ser necesarias. No obstante, el presente informe constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las condiciones de los sitios y analizar posibles afectaciones que puede tener la estructura del pavimento y cualquier otra obra cercana.

Se sugiere llevar a cabo estudios adicionales incluyendo una mayor cantidad de puntos de muestreo, ensayos in situ y de laboratorio, que constituye una exploración geotécnica más a detalle. Con ello sería posible establecer un modelo geotécnico específico y representativo de cada una de las zonas de estudio y, posterior a esto, realizar los respectivos análisis de estabilidad en condición tanto estática como pseudo-estática, así como evaluar diferentes condiciones de saturación de los materiales, dada la influencia observada en los análisis del presente informe, además evaluar diferentes propuestas de estabilización de los taludes y su respectiva optimización. La omisión de estos aspectos podría significar riesgos económicos y a los usuarios.



A partir de los resultados obtenidos en las modelaciones se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados y las condiciones evaluadas, los resultados de los factores de seguridad en la modelación tridimensional, en términos generales, presentaron incumplimientos con los valores mínimos recomendados por el CGTLCR, especialmente cuando fueron consideradas las condiciones saturadas de los taludes. Lo anterior se puede deber a que fue considerado que el sitio de estudio presenta un riesgo de pérdidas humanas en un nivel alto y el riesgo de daños económicos y ambientales en un nivel alto, no obstante, si se adoptan criterios menos conservadores con el respectivo sustento técnico pueden obtenerse mayores niveles de cumplimiento.

Como se mencionó en apartados anteriores, en los análisis realizados, se observó que bajo condiciones de saturación se observaron reducciones considerables en los valores de los factores de seguridad. Es necesario destacar que, en la visita de campo, fue posible observar que los taludes analizados carecen de sistemas de drenaje superficial y control de la escorrentía superficial, ambos aspectos se consideran de alta importancia ante la falta de protección superficial de la cara del talud observada en sitio. Debido a esto se considera apropiado implementar medidas que favorezcan la estabilidad del talud, como lo es el manejo de aguas de escorrentía superficial y evitar que se magnifiquen los problemas de estabilidad que fueron observados.

Los análisis de estabilidad con el método de equilibrio límite se realizaron de acuerdo con las metodologías de GLE Morgenstern-Price y Spencer. A pesar de ser teorías conocidas como rigurosas por utilizar ecuaciones de equilibrio y consideran las fuerzas que actúan sobre el talud, en algunos casos se obtuvieron resultados variables entre mismas condiciones de análisis para ambos métodos. Cabe resaltar que las diferencias principales entre las teorías Morgenstern-Price (GLE) y Spencer radican en su fundamentación teórica. GLE utiliza superficies de falla para determinar la estabilidad del talud y considera las fuerzas y momentos para calcular los factores de seguridad, además en el análisis pseudo estático considera tanto las fuerzas inerciales como las fuerzas estáticas. Por su parte Spencer se basa en la teoría de resistencia de materiales y utiliza ecuaciones basadas en el equilibrio de fuerzas para calcular los factores de seguridad.

Finalmente se considera importante complementar los análisis de estabilidad con análisis de esfuerzo-deformación en las zonas próximas a la superficie de ruedo usando el Método de Elementos Finitos (MEF), con la finalidad de incluir un análisis de deformaciones en los taludes y sectores próximos a éstos, y establecer posibles afectaciones que puede sufrir la vía debido a las deformaciones por la redistribución de los esfuerzos in situ y verificar el estado límite de servicio de los taludes, pavimento y cualquier otra obra de infraestructura cercana.

VII. Referencias

1. Asociación Costarricense de Geotecnia (2009). **Código de Cimentaciones de Costa Rica**. Segunda edición. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica
2. Asociación Costarricense de Geotecnia (2015). **Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica**. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica
3. Laboratorio de Geotecnia (2023). **EIC-Lanamme-INF-1321-2023 Informe de ensayo Estabilidad de taludes, Ruta # 2**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
4. Denyer, K.; Kussmaul, S. (2000) **Geología de Costa Rica**. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
5. Lukic, F. (2018). **Friction angle of soil and rock**. 6th International Conference. Contemporary achievements in civil engineering 20. Subotica, Serbia. DOI: 10.14415/konferencijaGFS2018.034



6. Subprograma de Investigación en Riesgos y Amenazas Naturales en la Infraestructura Vial (2004). **Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de la Ruta Nacional 2 Carretera Interamericana Sur Tramo San Isidro del Cartago – San Isidro de Pérez Zeledón**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
7. Unidad de Gestión de Infraestructura Vial (2009). **LM-GI-EV-01-2009 Informe de evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica Año 2008**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
8. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2018). **LM-PI-UGERVN-014-2018. Informe de Fiscalización. Ruta Nacional No. 2 Sección de Control 30090. Deslizamiento en PK 38+100**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
9. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2021). **EIC-Lanamme-UGERVN-006-2021. Análisis de sitios con vulnerabilidad a deslizamientos. Ruta Nacional N°2. Tramo San Isidro del Guarco – San Isidro del General**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
10. 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>