



## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-0954-2023

### Informe de evaluación de la condición y estabilidad de taludes en la Ruta Nacional 27



Preparado por:

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

San José, Costa Rica  
Agosto, 2023



<b>1. Informe</b> EIC-Lanamme-INF-0954-2023		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Informe de evaluación de la condición y estabilidad de taludes en la Ruta Nacional 27		<b>4. Fecha del Informe</b> 08/08/2023
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b> <i>Debido a las condiciones de estabilidad observada en algunos de los taludes de la Ruta Nacional 27, se presenta a continuación el resultado de los análisis de estabilidad de los taludes realizado. Los resultados de las simulaciones mostraron que los factores de seguridad son favorables en condiciones secas y estáticas, cumpliendo con las recomendaciones del CGTLCR. Sin embargo, en condiciones pseudo-estáticas o con niveles freáticos y saturación, los valores son inferiores a dichas recomendaciones. Por lo tanto, se sugiere una evaluación más detallada y la verificación de propuestas de estabilización y control de aguas para mejorar la estabilidad de los taludes. 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. Los cuales deben ser realizados por el profesional en geotecnia responsable de emitir las propuestas e implementar las obras necesarias. Los análisis se realizaron utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL), que no tiene en cuenta el comportamiento de esfuerzo-deformación, lo cual se considera importante para conocer las deformaciones en los bastiones del puente o el pavimento. Por lo tanto, para estudios adicionales, se debe considerar este enfoque al llevar a cabo análisis más exhaustivos.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Modelo de elevación digital, método de equilibrio límite, análisis de estabilidad, factor de seguridad.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> -	<b>10. Núm. de páginas</b> 47
<b>11. Preparado por:</b>          Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc. Programa de Ingeniería Geotécnica		
<b>12. Revisado por:</b>          Lic. Nidia Segura Unidad de Asesoría Legal		<b>13. Revisado y aprobado por:</b>          Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc Coordinadora del Programa de Ingeniería Geotécnica
Lic. Giovanni Sancho Coordinador Unidad de Asesoría Legal		



# Contenido

- I. Introducción ..... 7
- II. Antecedentes..... 7
  - I.1 Informes realizados en el estacionamiento 44+300..... 7
  - I.2 Informes realizados en la zona comprendida entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+0009
- III. Descripción del sitio..... 11
  - III.1 Geología local de la zona ..... 11
  - III.2 Condición actual ..... 13
    - III.2.1 Sector del estacionamiento 44+300 ..... 13
    - III.2.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000..... 13
- IV. Levantamiento en campo ..... 13
  - IV.1 Modelo de elevación digital (MED)..... 14
    - IV.1.1 Sector del estacionamiento 44+300 ..... 16
    - IV.1.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000..... 18
  - IV.2 Consideraciones para la elaboración del modelo geotécnico ..... 19
    - IV.2.1 Modelo geotécnico elaborado por INSUMA SA para el estacionamiento 44+300 ..... 19
    - IV.2.2 Caracterización y clasificación del macizo rocoso próximo al estacionamiento 44+300.... 21
    - IV.2.3 Modelo geotécnico considerado para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 24
- V. Comprobación de estabilidad de los taludes..... 25
  - V.1 Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) ..... 25
    - V.1.1.1 Sector del estacionamiento 44+300 ..... 30
    - V.1.1.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000..... 33
  - V.2 Análisis de secciones transversales utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en dos dimensiones (2D)..... 35
    - V.2.1 Sector del estacionamiento 44+300 ..... 35
    - V.2.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000..... 37
- VI. Levantamiento de la condición de otros taludes ..... 43
- VII. Comentarios finales..... 45
- VIII. Referencias ..... 46



## Índice de figuras

Figura 1. Condición observada en talud de relleno del estacionamiento 48+000 en el año 2013 .....	9
Figura 2. Zonas identificadas con afectaciones producidas por el drenaje ácido de rocas (DAR) próximas al estacionamiento 48+000 en el año 2016 ( <i>Fuente: INF-UGERVN-05-2016</i> ).....	10
Figura 3. Ubicación espacial del sitio de estudio en el estacionamiento 44+300.....	12
Figura 4. Ubicación espacial del sitio de estudio entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000....	12
Figura 5. Modelos de elevación digital (MED) de la zona del estacionamiento 44+300 .....	15
Figura 6. Modelos de elevación digital (MED) de la zona entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000.....	15
Figura 7. Mapa de pendientes y clasificación según van Zuidam (1986) del sector del estacionamiento 44+300.....	17
Figura 8. Curvas de nivel a cada 2 m obtenidas a partir del modelo de elevación digital para el sector del estacionamiento 44+300 .....	17
Figura 9. Mapa de pendientes y clasificación según van Zuidam (1986) en el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 .....	18
Figura 10. Curvas de nivel a cada 1 m obtenidas a partir del modelo de elevación digital en el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 .....	19
Figura 11. Modelo geotécnico considerado en los análisis de estabilidad del estacionamiento 44+460 ( <i>Fuente: Informe #2515-20_rev2 elaborado por INSUMA</i> ).....	20
Figura 12. Caracterización de un macizo rocoso fracturado en función de la trabazón del macizo y las condiciones de sus discontinuidades .....	22
Figura 13. Condición del macizo rocoso observado en las proximidades del km 44+300 de la Ruta Nacional 27.....	23
Figura 14. Información general del puente sobre el río Salitral a) vista en planta, b) vista en elevación del puente incluida en los planos estructurales y espesores de capas adoptados ( <i>Fuente: Informe LM-PI-UP-PC05-2013</i> ).....	25
Figura 15. Modelo de elevación en el estacionamiento 44+300 de la Ruta Nacional 27 utilizado en el software de estabilidad de taludes .....	27
Figura 16. Modelo de elevación para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 utilizado en el software de estabilidad de taludes .....	27
Figura 17. Modelo geotécnico y parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad tridimensional utilizado en el software de estabilidad de taludes del estacionamiento 44+300 .....	29
Figura 18. Modelo geotécnico y parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad tridimensional utilizado en el software de estabilidad de taludes para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000.....	30



Figura 19. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software de estabilidad de taludes en el sector del estacionamiento 44+300 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática..... 31

Figura 20. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Morgenstern-Price en el software de estabilidad de taludes en el sector del estacionamiento 44+300 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática ..... 32

Figura 21. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software de estabilidad de taludes para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática ..... 33

Figura 22. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Morgenstern-Price en el software de estabilidad de taludes para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática ..... 34

Figura 23. Secciones transversales analizadas en dos dimensiones en el sector del estacionamiento 44+300..... 35

Figura 24. Factores de seguridad obtenidos en simulaciones bidimensionales en el software de estabilidad de taludes en la sección transversal correspondiente al Sección 1 en el sector del estacionamiento 44+300 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática ..... 36

Figura 25. Secciones analizadas en dos dimensiones para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 ..... 38

Figura 26. Factores de seguridad obtenidos en simulaciones bidimensionales en el software de estabilidad de taludes en la sección definida como Puente, localizada en las proximidades del acceso 1 (Este) del puente sobre el río Salitral, para diferentes condiciones: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática ..... 39

Figura 27. Factores de seguridad obtenidos en simulaciones bidimensionales en el software de estabilidad de taludes en la sección definida como Carretera 1, localizada aproximadamente 250 metros antes del puente sobre el río Salitral, para diferentes condiciones: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática ..... 40



## Índice de tablas

Tabla 1. Clases de pendientes, condiciones del terreno y colores sugeridos .....	16
Tabla 2. Distribución de frecuencia de las clases de pendientes obtenidas en el estacionamiento 44+300 .....	16
Tabla 3. Distribución de frecuencia de las clases de pendientes obtenidas en el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 .....	18
Tabla 4. Parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad del estacionamiento 44+300 (Fuente: Adaptado del informe #2515-20_rev2 elaborado por INSUMA).....	20
Tabla 5. Valores de la constante $m_i$ para roca intacta por tipo de roca .....	21
Tabla 6. Parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 (Fuente: Adaptado del informe #2515-20_rev2 elaborado por INSUMA) .....	25
Tabla 7. Modelo geotécnico del estacionamiento 44+300.....	28
Tabla 8. Modelo geotécnico para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000.....	29
Tabla 9. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en las diferentes secciones analizadas .....	37
Tabla 10. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en las diferentes secciones analizadas .....	41
Tabla 11. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en las diferentes secciones analizadas .....	44



# Informe de evaluación de la condición y estabilidad de taludes en la Ruta Nacional 27

## I. Introducción

Como parte de las labores que le otorga la ley 8114 al LanammeUCR, el presente informe muestra los resultados preliminares del análisis de estabilidad tridimensional en la zona próxima al km 44+300 (conocida como el sector del hundimiento) y en la zona próxima al km 48+000 (próxima al puente sobre el río Salitral) de la Ruta Nacional 27. Estos análisis tienen la finalidad de verificar las afectaciones en los taludes y la carretera nacional dada la condición actual del sitio.

Cabe resaltar que el análisis realizado responde a las evidencias de inestabilidad del terreno tales como agrietamientos, hundimientos y topografía de las zonas evaluadas. Se comentan algunos aspectos geotécnicos observado en campo respecto a la condición del terreno y las posibles afectaciones sobre la Ruta Nacional 27.

## II. Antecedentes

Bajo el marco de la Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria, el LanammeUCR ha venido realizando una serie de evaluaciones anuales de las carreteras administradas bajo la modalidad de concesión de obra pública. De esta manera, la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) del Programa de Infraestructura del Transporte del LanammeUCR ha emitido diversos informes relacionados con condiciones geotécnicas observadas en varios taludes de la Ruta Nacional 27. Entre estos taludes, se destacan a continuación problemas de estabilidad en el estacionamiento 44+300 y el tramo comprendido entre el estacionamiento 47+500 hasta el estacionamiento 48+000. Adicionalmente, se evaluó la condición de los taludes encontrados en los estacionamientos 38+500 y el estacionamiento 40+750, los cuales presentaron problemas de deslizamientos en noviembre del 2014 y que han recibido por parte de la empresa concesionaria Globalvia algunas actividades de reconformación y mantenimiento.

### I.1 Informes realizados en el estacionamiento 44+300

Entre los principales aspectos relacionados con los problemas de estabilidad observados en el estacionamiento 44+300 de la Ruta Nacional 27 que han sido mencionados se tiene:

- *Informe LM-PI-UE-002-11*: es este informe se identificaron los primeros agrietamientos característicos del deslizamiento con afectación sobre el terraplén, con la presencia de desniveles apreciables en la carpeta en los estacionamientos 44+300 y 44+510.
- *Informe INF-PI-UGERVN-04-2017*: en este informe se hace referencia al informe 406B-12 INSUMA, en el cual se indica que el desplazamiento en el talud del km 44+500 se ve influenciado por el levantamiento del nivel freático, influyendo en el comportamiento mecánico del relleno. Así mismo, en el informe de la UGERVN se indica que en el año 2014 se realizaron movimientos de tierra en el relleno y que se llevó a cabo la construcción de cunetas de concreto y perforaciones para instalar drenajes sub-horizontales. Por su parte, se indicó que desde finales del 2016 y principios de 2017 se observaron deformaciones en la carpeta asfáltica.
- *Informe INF-PI-UGERVN-12-2018*: en este informe se destaca que, durante la estación lluviosa de 2017, los asentamientos que se presentaron en este sitio se intensificaron. Debido a esto se realizaron trabajos de intervención en el terraplén, con la remoción de material inestable,



perforaciones para la construcción de un muro anclado y una pantalla de pilotes al pie del relleno, con la finalidad de interceptar la superficie de falla y estabilizar la base del sitio.

- *Informe INF-PI-UGERVN-12-2020:* en este informe se hace mención a la colocación de tuberías de sondas piezométricas y sondas inclinométricas por parte del LanammeUCR hasta una profundidad de 45m con el fin de hacer mediciones de cambios en el nivel freático y desplazamientos horizontales. Estas mediciones fueron complementadas con estudios de tomografía eléctrica de 100 metros de longitud. A partir de estos resultados se detecta una posible superficie de deslizamiento a una profundidad de aproximadamente 21 m, cuyos desplazamientos se incrementaban en velocidad y magnitud durante los periodos de lluvias, a pesar de las obras realizadas en el 2018.
- *Informe EIC-Lanamme-INF-0140-2021:* en este informe se indica que el muro anclado y la viga de amarre de la pantalla de pilotes construida al pie del muro anclado presentaba varios sectores con grietas y desplazamientos importantes, mostrando la continuación de inestabilidad en la zona.
- *Informe EIC-Lanamme-INF-0776-2022:* en este informe se menciona que fue realizada una revisión de los sismos que pudieron ser generadores de deslizamientos en la Ruta Nacional 27. No obstante, después de la revisión no fueron identificados deslizamientos que se puedan atribuir de forma directa. Únicamente, se determinó que el sismo de Jacó, con una magnitud de 6.3 Mw del 12 de noviembre de 2017, pudo ser un disparador del deslizamiento de un talud aguas abajo del puente sobre el río Virilla en la Ruta Nacional 27, deslizamiento que no tuvo afectaciones ni en el puente, ni la carretera. Adicionalmente, en este mismo informe, se realizaron análisis comparativos de modelos de elevación digital de los años 2017, 2019 y 2022. De los análisis realizados se determinó que, con respecto a la superficie de 2017, las superficies de los años 2019 y 2022 experimentaron cambios verticales relativos hacia abajo, que coinciden con el movimiento del terreno que se está deslizando.

Por su parte, el informe #2515-20\_rev2 del 14 de enero del 2021, elaborado por INSUMA establece que los problemas de estabilidad de la zona de estudio fueron identificados por parte de Globalvía desde el año 2011, antes de que el LanammeUCR los detectara, tal y como se ha dicho en diferentes medios. El documento brinda algunos detalles adicionales acerca de la pantalla de pilotes y el muro anclado construidos entre los periodos de 2018-2019, en el cual se indica que el muro de pantalla tiene una longitud de 25 a 33 de metros. Por su parte, el muro anclado posee 4 niveles de anclaje de 40 m de longitud y 60 toneladas de capacidad.

Se menciona que el control topográfico e instrumentación colocada coincide con las observaciones del LanammeUCR, en las cuales se indica que los movimientos del terreno en la zona de estudio se incrementan durante la época lluviosa y prácticamente se detienen durante la época seca demostrando una clara influencia del agua sobre las condiciones de estabilidad de masa. Así pues, en el informe de INSUMA se menciona que los modelos numéricos utilizados en los análisis bidimensionales de estabilidad de la zona incorporan la superficie de falla determinada por los análisis de INSUMA y el LanammeUCR. Además, los análisis realizados consideran las características geológicas-geotécnicas de la zona. Es importante destacar que en el informe de INSUMA se indica que, a pesar de la construcción de las obras de estabilización, las deformaciones en el sitio han continuado debido a que, el sismo de magnitud de 6.0 Mw, ocurrido el 24 de agosto de 2020 con epicentro a unos 45-50 km de la zona del hundimiento, fue el disparador de un problema de estabilidad mayor de la zona, donde las deformaciones de mayor magnitud y velocidad iniciaron después de este evento. Según INSUMA, las aceleraciones asociadas con este sismo se combinaron con un periodo de lluvias importantes y de socavación de la base de la ladera natural.





## I.2 Informes realizados en la zona comprendida entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

Entre los principales aspectos relacionados con los problemas de estabilidad observados entre el estacionamiento 47+500 hasta el estacionamiento 48+000, próximo al puente sobre el cauce del río Salitral de la Ruta Nacional 27 se tiene:

- *Informe LM-PI-PV-ERV-27-10*: este informe es uno de los primeros informes en los cuales se identificaron condiciones de hidrotermalismo en los estacionamientos 47+100 y 47+700, con la presencia de un aroma leve a sulfato. Adicionalmente se identificó la ausencia de contracunetas y cunetas, así como la falta de medidas de protección de la cara de los taludes ante la escorrentía superficial. Como se indicaba en este informe esta situación puede permitir la acumulación de agua en los canales no impermeabilizados produciendo un “encharcamiento” y saturación de los materiales que componen el talud, aumentando su susceptibilidad a los deslizamientos. En el caso del talud del estacionamiento 47+200 se mencionó que fue colocada una malla para protección contra caídos y desprendimientos.
- *Informe LM-PI-UGERVN-007-2013*: en este informe se indica que en el estacionamiento 47+800 fueron identificados algunos deslizamientos menores en el talud derecho (sentido San José-Caldera), se advierte que las medidas adoptadas no son suficientes para disminuir el lavado de materiales finos. Por su parte en el relleno del lado izquierdo (sentido San José-Caldera) se indicaba que los materiales se encontraban en una condición suelta y sin protección superficial para evitar o, por lo menos, disminuir los efectos de la escorrentía superficial. En el caso del estacionamiento 47+850, los taludes de corte a ambos lados presentan afectaciones por alteración hidrotermal, no obstante, la cara de los taludes se encuentra expuesta a los agentes erosivos. Por su parte, en el estacionamiento 48+000 se observó que el talud del relleno del lado izquierdo, próximo al bastión del cauce del río Salitral, presentaba una condición suelta y sin protección superficial contra el lavado por el agua de escorrentía, razón por la cual este talud presentaba evidencias de un deslizamiento importante en este sector (ver Figura 1)



Figura 1. Condición observada en talud de relleno del estacionamiento 48+000 en el año 2013 (Fuente: Informe LM-PI-UGERVN-007-2013)

- *Informe INF-UGERVN-05-2016*: en este informe de seguimiento, se indica que el deterioro de los taludes próximos al estacionamiento 48+000, tanto en el material original (lavas muy fracturadas y alteradas hidrotermalmente), como en el concreto lanzado y acero de refuerzo empleado en algunas obras de estabilización realizadas en este sector, han presentado daños

Informe EIC-Lanamme-INF-0954-2023	agosto, 2023	Página 9 de 47
-----------------------------------	--------------	----------------



importantes por la presencia de drenajes ácidos de rocas (DAR), lo cual pudo ser corroborado con mediciones de pH realizadas en este sector. En este informe se señala la zona en la cual se ha identificado la ocurrencia de DAR, donde se muestran los taludes afectados en la carretera y los botaderos o rellenos de material (ver Figura 2). Según este mismo informe, la ocurrencia de este proceso químico en los taludes y el botadero, podría estar generando lixiviados ácidos que bajan en dirección hacia el cauce del Río Salitral, lo cual eventualmente podría afectar directamente las fundaciones del puente. Según se indica, lo anterior ha sido señalado en otros informes: LM-PI-UGERVN-007-2013, INF-PI-UGERVN-005-2014, INF-PI-UGERVN-014-2014 y INF-PI-UGERVN-008-2015



Figura 2. Zonas identificadas con afectaciones producidas por el drenaje ácido de rocas (DAR) próximas al estacionamiento 48+000 en el año 2016 (Fuente: INF-UGERVN-05-2016)

- *Informe INF-PI-UGERVN-04-2017:* en este informe de seguimiento se menciona nuevamente que los taludes de corte localizados en las inmediaciones del estacionamiento 48+000 se mantienen expuestos, razón por la cual el proceso de alteración de las rocas expuestas al hidrotermalismo, presencia de materiales sulfurosos, oxígeno y humedad ha favorecido el proceso de DAR de estos materiales, lo cual ha provocado deterioro en el concreto lanzado y el acero de refuerzo colocado en este sector. Por estas razones, se sugirió en el informe, realizar intervenciones mediante el diseño e instalación de sistemas integrales para reducir el fenómeno de DAR, combinado con la protección superficial de los taludes, utilizando materiales resistentes a los daños producidos por el nivel de acidez de este sector.
- *Informe INF-PI-UGERVN-12-2018:* en este informe de seguimiento se menciona las mismas observaciones que se han hecho en los informes anteriores respecto a la presencia del DAR en el sector del estacionamiento 48+000.
- *Informe INF-PI-UGERVN-01-2019:* en este informe de seguimiento, además de lo mencionado anteriormente relacionado con la presencia de DAR en los taludes, se menciona una vez más los problemas existentes en los bajantes y cunetas. Por su parte, se menciona que, en el sector oeste, del lado izquierdo de la carretera (sentido San José – Caldera) el material del botadero



mantiene los mismos problemas de erosión y formación de cárcavas (de aproximadamente 4 m) que fueron identificados en el 2013.

- *Informe INF-PI-UGERVN-12-2020*: en este informe de seguimiento, se pudo observar que el concreto y el acero colocado en los taludes próximos al estacionamiento 48+000, continúan presentando daños por el deterioro acelerado debido al DAR. Se destaca que estas zonas han sido intervenidas por el Concesionario, sin embargo, en estas intervenciones continúan empleando los mismos materiales que han demostrado que no reúnen las condiciones para ser utilizados en medios ácidos, por lo cual es de esperar que al colocar los mismos materiales en el mismo medio ácido se produzca nuevamente un deterioro acelerado de las intervenciones realizadas.

### III. Descripción del sitio

#### III.1 Geología local de la zona

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

En general, esta área pertenece a la formación Grifo Alto, que se caracteriza por la presencia de brechas volcánicas y coladas de lava masivas. De la caracterización de los materiales realizada por Ruiz *et al.* (2015) los materiales presentes corresponden a **andesitas**, cuya descripción microscópica corresponde a una textura holocristalina porfirítica, matriz (60%), pilotaxítica compuesta de microlitos de plagioclasa como único mineral reconocible, fenocristales (25%), plagioclasa (25%) hipidiomórficos con zonación continua, minerales de alteración (14%): calcita (sustituyendo las plagioclasas en un 15%), pirita (5%), hematita (3%), clorita verde (4%) y ceolita (2%), minerales accesorios (>1%), apatito y zircón. Esta formación está compuesta de rocas volcánicas, del Plioceno, expuestas en los montes del Aguacate, predominantemente brechas volcánicas de diversos tipos, constituidas por fragmentos de pómez y de lavas, y depósitos aluvionales, además de coladas subordinadas. También se observa en algunos sectores cuerpos hipoabisales (diques/sills) con profusa alteración propilítica, lo que, sumado a la fuerte alteración hidrotermal de la zona, evidencia la presencia de un antiguo estratovolcán (Porrás *et al.*, 2012).

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

El sitio de análisis del estacionamiento 44+300 se ubica en el distrito de Escobal, cantón de Atenas, provincia de Alajuela en el sector entre las quebradas Cedro y Nances, tal y como se observa en la Figura 3.

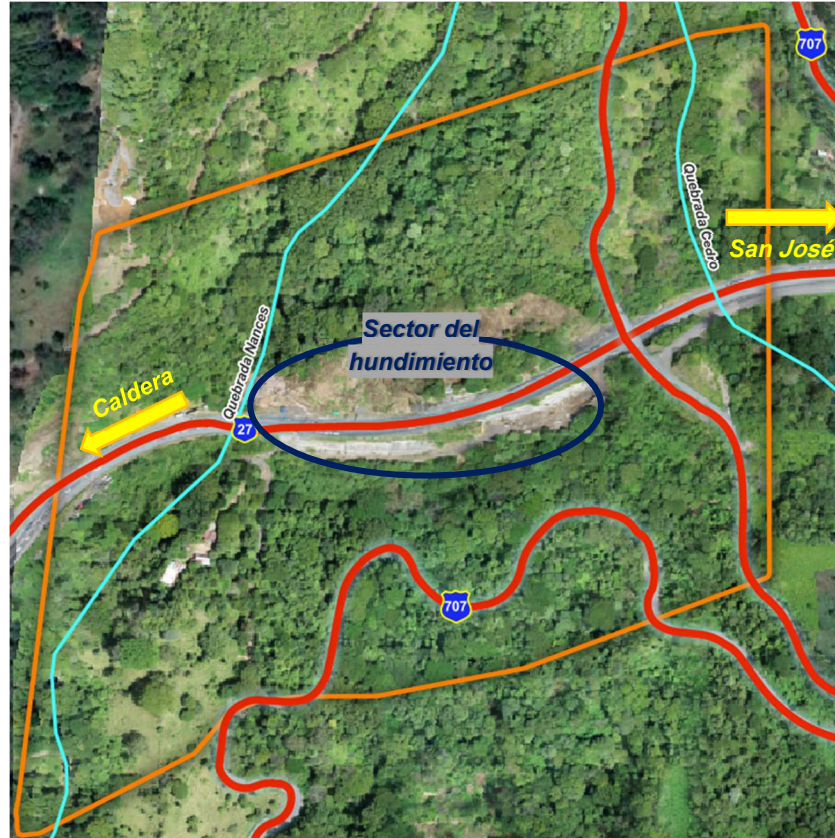


Figura 3. Ubicación espacial del sitio de estudio en el estacionamiento 44+300

Por su parte, la zona comprendida entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 se ubica en el distrito de Hacienda Vieja, cantón de Orotina, provincia de Alajuela, tal y como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Ubicación espacial del sitio de estudio entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

Informe EIC-Lanamme-INF-0954-2023	agosto, 2023	Página 12 de 47
-----------------------------------	--------------	-----------------



### III.2 Condición actual

#### III.2.1 Sector del estacionamiento 44+300

Actualmente el sitio se encuentra con vegetación autóctona densa en la zona de interés. Cabe resaltar que la vegetación es una limitante para obtener con precisión la topografía y composición geotécnica de la zona de estudio. Se realizaron levantamientos de las características del sitio mediante inspección de campo, se aplicaron criterios geotécnicos para la obtención de propiedades geomecánicas de los materiales presentes en el sitio que, aunado al uso de equipos tecnológicos, fue posible la generación de un modelo de elevación digital del sitio.

Es importante mencionar que, durante las visitas realizadas, se observó que algunos sectores carecen de sistemas para el control de escorrentía superficial, lo cual no permite la adecuada evacuación de las aguas provenientes de la lluvia, pudiendo eventualmente desencadenar problemas de erosión en los taludes y agravar la situación de estabilidad de estos.

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

#### III.2.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

Según los informes mencionados anteriormente, así como lo indica Ruiz *et al.* (2015), la Ruta Nacional 27 durante su construcción y posterior inauguración en el año 2010 ha venido presentados problemas de estabilidad de taludes en varios sectores, en el caso del estacionamiento 48+000, se habían identificados rocas afectadas por alteración hidrotermal. Sin embargo, los problemas de estabilidad en este sector van más allá de la alteración hidrotermal, donde las características físicas y químicas de las rocas se han visto afectadas directamente por el proceso llamado “drenaje ácido de roca” (DAR). Para conocer en más detalle este fenómeno se puede consultar el artículo “Drenaje ácido de rocas en taludes de la ruta nacional 27”, elaborado por de Ruiz *et al.* (2015).

Se realizaron levantamientos de las características del sitio mediante inspección de campo, se aplicaron criterios geotécnicos para la obtención de propiedades geomecánicas de los materiales presentes en el sitio que, aunado al uso de equipos tecnológicos, fue posible la generación de un modelo de elevación digital del sitio.

Es importante mencionar que, durante las visitas realizadas, al igual que en el estacionamiento 44+300, se observó que algunos sectores carecen de sistemas para el control de escorrentía superficial, lo cual no permite la adecuada evacuación de las aguas provenientes de la lluvia, pudiendo eventualmente desencadenar problemas de erosión en los taludes y agravar la situación de estabilidad de estos.

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

### IV. Levantamiento en campo

Debido al histórico de los deslizamientos que se han presentado en el km 44+300 de la Ruta Nacional 27, que se han manifestado con deformaciones o hundimientos de la capa de ruedo desde el año 2011;

Informe EIC-Lanamme-INF-0954-2023	agosto, 2023	Página 13 de 47
-----------------------------------	--------------	-----------------



así como también en el km 48+000 con deslizamientos, presencia de caídos de bloques de roca y planos de falla en la roca, se justifica la necesidad de realizar un análisis de estabilidad de los sitios, dada la condición de vulnerabilidad en la que se encuentra la carretera. Así pues, el Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR procedió a realizar los análisis de carácter preliminar que se presentan a continuación, considerando la limitante de no contar con una campaña geotécnica exhaustiva para determinar las propiedades de los materiales específicos de la zona, y por lo tanto, recurrir a la información disponible por parte de Globalvia e INSUMA sobre la caracterización de los materiales. A continuación, se muestra el trabajo realizado para poder desarrollar los análisis preliminares.

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

Inicialmente, con la colaboración de la Oficina de Geomática (OGEO) del LanammeUCR, se realizaron levantamientos con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona del estacionamiento 44+300 los días 12 y 14 de octubre de 2022. Por su parte en el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 se realizó un sobrevuelo el día 20 de abril de 2023.

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.

Teniendo esto en consideración y con base en el levantamiento realizado por el VANT de la OGEO con alturas de vuelo entre los 90 a 100 metros sobre la superficie del terreno, fue posible obtener los modelos de elevación que se muestran en la Figura 5 del estacionamiento 44+300 y la Figura 6 del sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000. Como se observa en la Figura 5, el levantamiento realizado permitió recrear de una manera adecuada la superficie del terreno (sin la presencia de la vegetación) para su posterior análisis. En la Figura 5 los colores celestes y verdes representan los puntos más bajos (166 m.s.n.m.) y los colores café oscuro representan los puntos más elevados (361 m.s.n.m.). Por otro lado, en la Figura 6 del sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 los colores verdes representan los puntos más bajos (145 m.s.n.m.) y los colores anaranjados y café oscuro representan los puntos más elevados (250 m.s.n.m.). En ambas figuras la topografía presenta pendientes con inclinaciones hacia la margen del río Tárcoles, localizado hacia la parte inferior de las figuras.

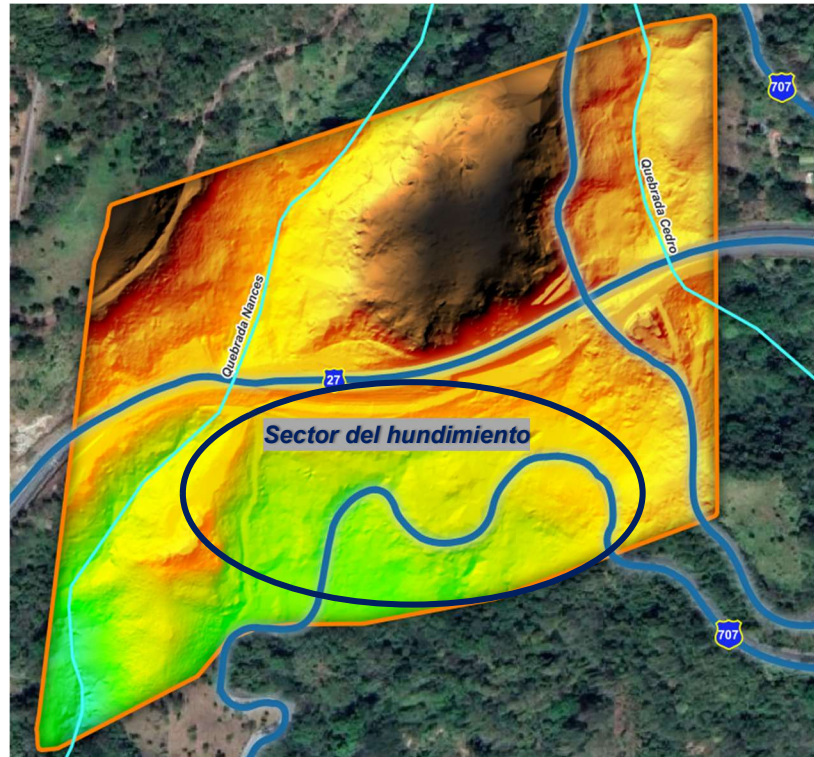


Figura 5. Modelos de elevación digital (MED) de la zona del estacionamiento 44+300

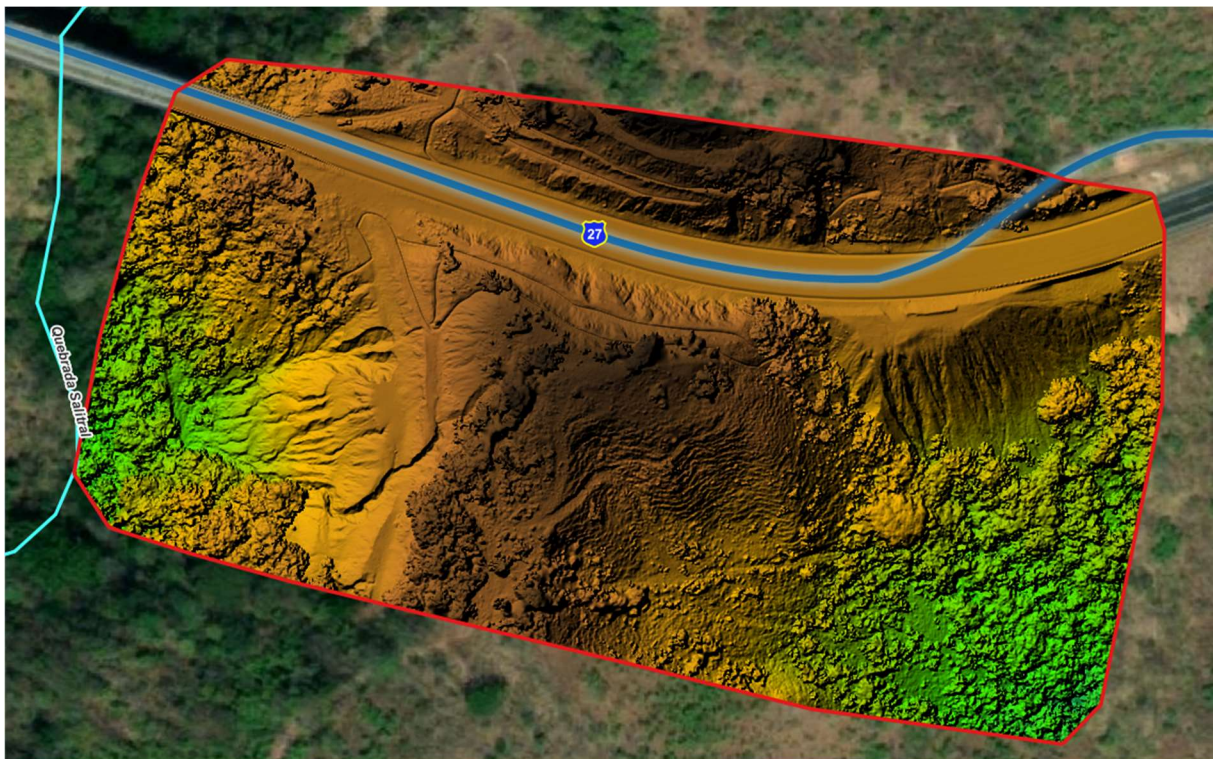


Figura 6. Modelos de elevación digital (MED) de la zona entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000



La pendiente del terreno constituye uno de los factores más importantes en los movimientos o deslizamientos del terreno. En áreas con pendientes abruptas la erosión hídrica y los procesos gravitacionales se manifiestan con mayor intensidad. De esta manera, para caracterizar el terreno y los posibles procesos esperados en el área de estudio, se utilizó la caracterización de clases de pendiente sugeridas por van Zuidam (1986) y la leyenda de colores sugerida por el mismo autor (ver Tabla 1).

Tabla 1. Clases de pendientes, condiciones del terreno y colores sugeridos

Clase de pendiente (°)	Condiciones del terreno	Color
0-2	Planicie, sin denudación apreciable	Verde oscuro
2-4	Pendiente muy baja, peligro de erosión	Verde claro
4-8	Pendiente baja, peligro severo de erosión	Amarillo
8-16	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo	Naranja
16-35	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	Rojo claro
35-55	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	Rojo oscuro
>55	Extremamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada.	Morado

Las clases de pendiente pueden coincidir con los sectores críticos, donde los procesos de deslizamiento son dominantes. Con base en esta clasificación, los datos obtenidos del modelo de elevación digital y el procesamiento de la información con un Sistema de Información Geográfica (SIG), es posible obtener la clasificación de las pendientes características en los sectores analizados.

#### IV.1.1 Sector del estacionamiento 44+300

A partir del modelo de elevación que se mostró en la Figura 5, es posible obtener la siguiente situación: Tabla 2 y la Figura 7, en la cual se puede concluir que la topografía en la zona de estudio presenta de forma predominante pendientes fuertes (aproximadamente 41,0%), siguiéndole en orden de importancia las pendientes muy fuertes (21,6%), caracterizados con procesos denudacionales intensos (deslizamientos) y con condiciones extremas de erosión de suelos. Lo cual coincide con las condiciones observadas en campo durante las visitas realizadas.

Tabla 2. Distribución de frecuencia de las clases de pendientes obtenidas en el estacionamiento 44+300

Clase de pendiente (°)	Frecuencia (%)	Tipo de pendiente
0-2	5,7	Planicie
2-4	3,6	Muy baja
4-8	10,2	Baja
8-16	14,8	Moderada
16-35	41,0	Fuerte
35-55	21,6	Muy fuerte
>55	3,1	Extremamente fuerte



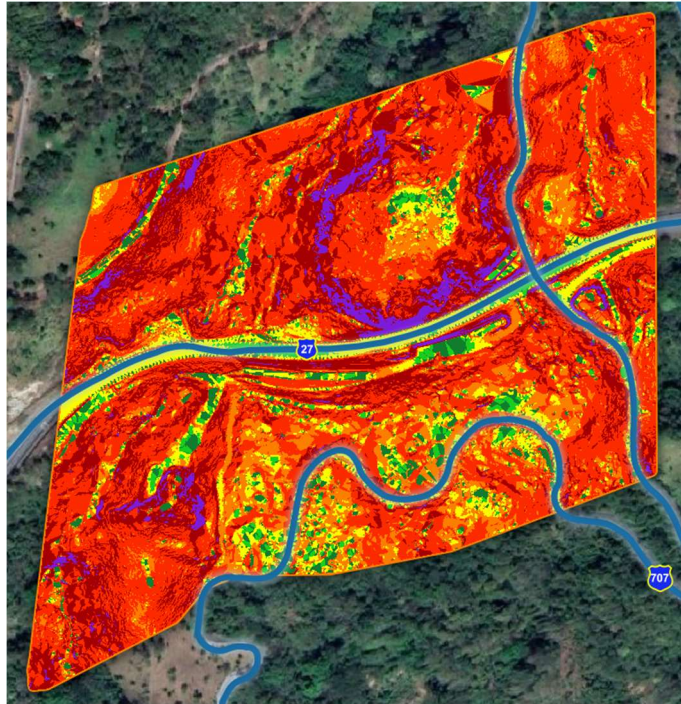


Figura 7. Mapa de pendientes y clasificación según van Zuidam (1986) del sector del estacionamiento 44+300

Con la ayuda del software QGIS fue posible utilizar el modelo de elevación digital anterior para generar las curvas de nivel representativas de la superficie del terreno, dicho modelo se puede ver representado en la Figura 8, en el cual se han calculado las curvas de nivel en intervalos a cada 2 m.

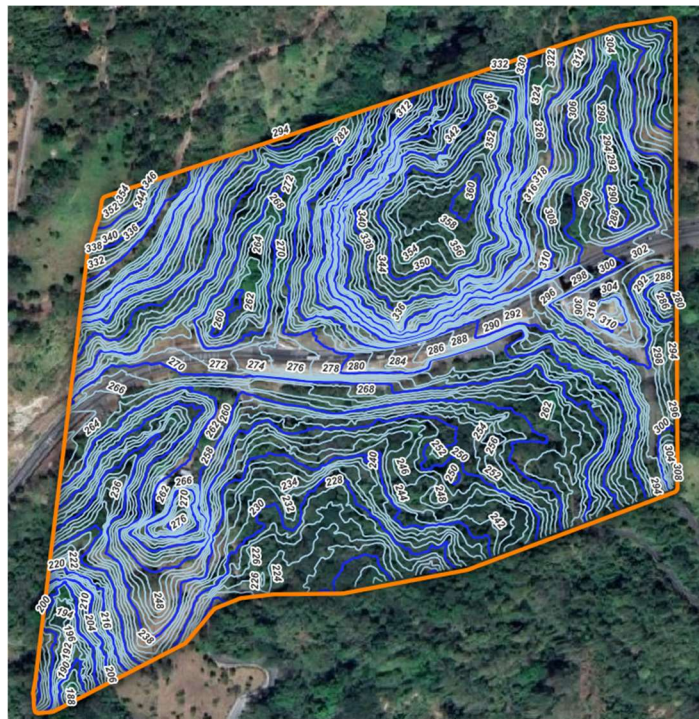


Figura 8. Curvas de nivel a cada 2 m obtenidas a partir del modelo de elevación digital para el sector del estacionamiento 44+300

**IV.1.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000**

De la misma forma en que se procedió con el estacionamiento 44+300, para este sector se determinó que la topografía presenta pendientes fuertes (aproximadamente 32,1%), siguiéndole en orden de importancia las pendientes muy fuertes (28,2%) y extremadamente fuertes (17,2%), caracterizados con procesos denudacionales intensos (deslizamientos y caídas de rocas) y con condiciones extremas de erosión de suelos y cobertura vegetal limitada (ver Tabla 3 y Figura 9)

Tabla 3. Distribución de frecuencia de las clases de pendientes obtenidas en el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

Clase de pendiente (°)	Frecuencia (%)	Tipo de pendiente
0-2	2,2	Planicie
2-4	3,3	Muy baja
4-8	7,2	Baja
8-16	9,8	Moderada
16-35	32,1	Fuerte
35-55	28,2	Muy fuerte
>55	17,2	Extremadamente fuerte

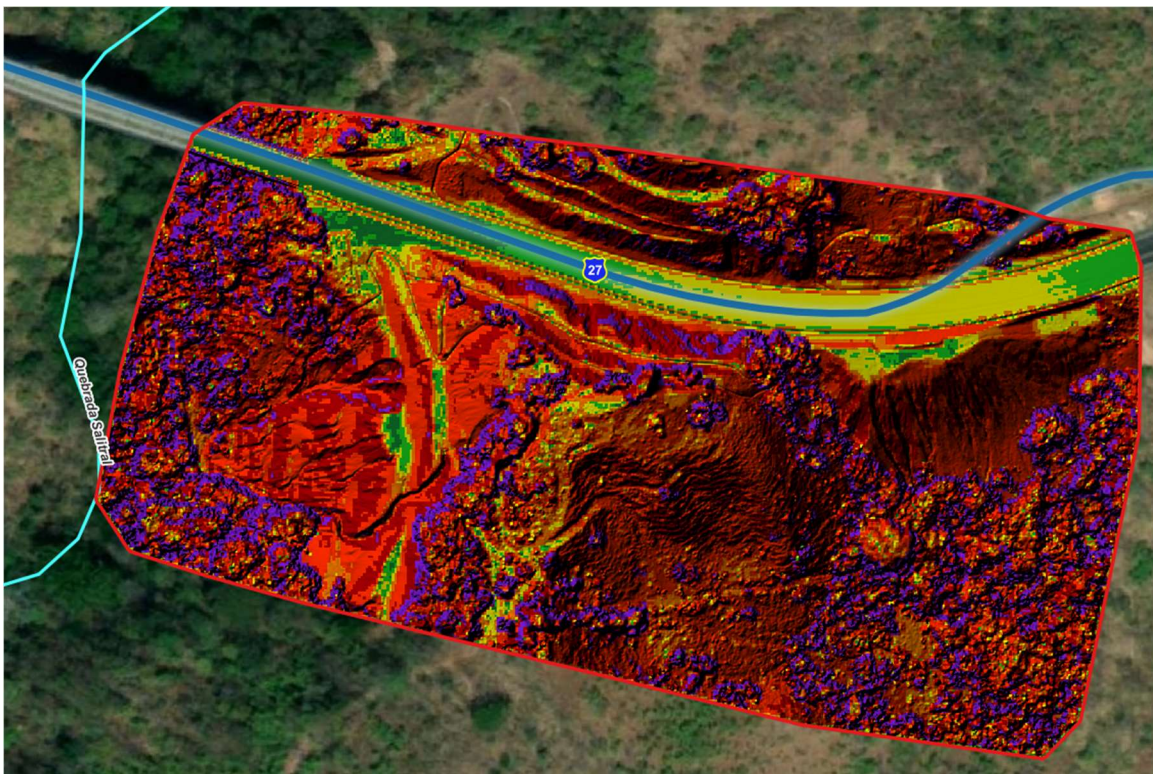


Figura 9. Mapa de pendientes y clasificación según van Zuidam (1986) en el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

Nuevamente, con la ayuda del software QGIS fue posible utilizar el modelo de elevación digital anterior para generar las curvas de nivel representativas de la superficie del terreno, dicho modelo se puede ver representado en la Figura 10, en el cual se han calculado las curvas de nivel, divididas en primarias en color azul espaciadas cada 10 m y etiquetadas, y las secundarias en color celeste en intervalos a cada 1 m.

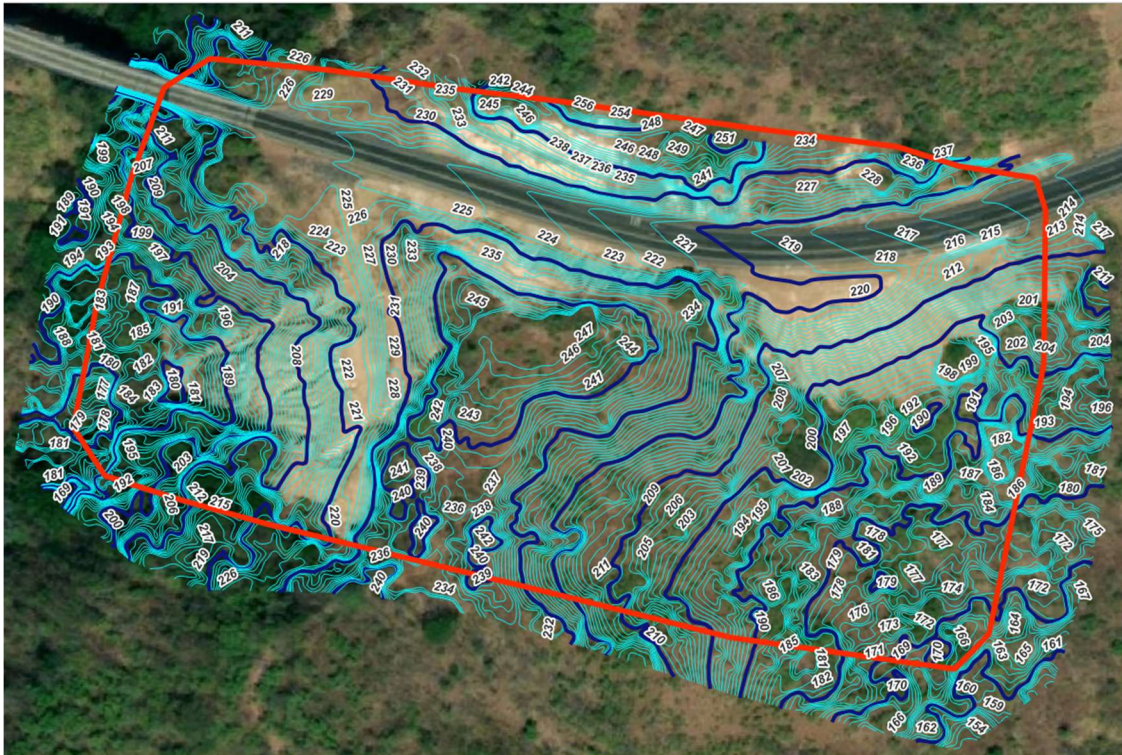


Figura 10. Curvas de nivel a cada 1 m obtenidas a partir del modelo de elevación digital en el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

## IV.2 Consideraciones para la elaboración del modelo geotécnico

### IV.2.1 Modelo geotécnico elaborado por INSUMA SA para el estacionamiento 44+300

Para la realización de la modelación tridimensional del sector del hundimiento de la Ruta Nacional 27, se procedió a analizar la información existente sobre los modelos geotécnicos existentes para la zona de estudio. En este sentido, se utilizó como base el modelo elaborado por INSUMA SA, en el informe #2515-20\_rev2 del 14 de enero del 2021.

Según este informe el modelo integra la topografía del sitio, la estratigrafía, los parámetros geomecánicos de los distintos materiales encontrados en este sector, así como la profundidad de una superficie de falla identificada con el uso de medidas directas obtenidas de algunos inclinómetros y con topografía localizando las evidencias de movimiento en la superficie. Este modelo fue el resultado de la recopilación, análisis y síntesis de la información obtenida por parte de Globalvía, el LanammeUCR e INSUMA.

Es importante destacar que según la información obtenida por INSUMA, y corroborada por los informes de evaluación realizados por la UGERVN del LanammeUCR, fue posible determinar que los movimientos de toda la zona se incrementan durante la época lluviosa y prácticamente se detienen durante la época seca, lo cual demuestra la fuerte influencia de la presencia de agua en las condiciones de estabilidad de la zona de análisis.

Así pues, con base en el informe #2515-20\_rev2, en la Tabla 4 se presentan los parámetros de resistencia adoptados en los modelos y en la Figura 11, se muestra el modelo geotécnico considerado en los análisis de estabilidad del estacionamiento 44+460. Según este informe los parámetros asociados

Informe EIC-Lanamme-INF-0954-2023	agosto, 2023	Página 19 de 47
-----------------------------------	--------------	-----------------



al material denominado como Capa2, corresponde a parámetros de resistencia residuales en la superficie de falla determinada, cuyos valores corresponden con un valor de ángulo de fricción de  $18^\circ$  y una cohesión de 0 kPa. Por su parte, los parámetros de resistencia para las otras capas se consideraron como valores conservadores. De esta manera, según se observa en la Figura 11, se determinó un espesor promedio para cada una de las capas de 15, 12 y 18 m para la Capa\_1a, Capa\_2 y Capa\_3, respectivamente.

Tabla 4. Parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad del estacionamiento 44+300  
(Fuente: Adaptado del informe #2515-20\_rev2 elaborado por INSUMA)

Material	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción, $\phi$ (°)
Capa_1a	20	5	30
Capa_2	17	0	18
Capa_3	20	100	30
Capa_4	22	100	35

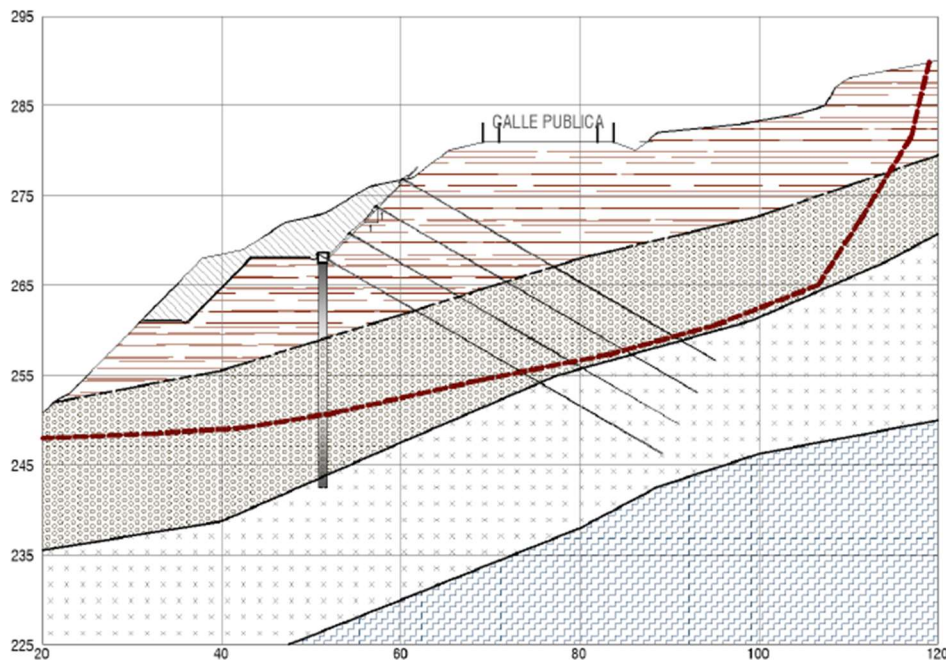


Figura 11. Modelo geotécnico considerado en los análisis de estabilidad del estacionamiento 44+460 (Fuente: Informe #2515-20\_rev2 elaborado por INSUMA)

Es importante mencionar que el modelo geotécnico anterior, presentado en el Informe #2515-20\_rev2 elaborado por INSUMA, corresponde al modelo que fue utilizado para el diseño de la obra de estabilización y análisis de estabilidad de la solución propuesta al problema de estabilidad en la Ruta Nacional 27, no obstante, este modelo consideró principalmente el talud de relleno a media ladera del lado izquierdo (sentido San José – Caldera) de la vía. Sin embargo, según la inspección visual realizada, en el caso del talud derecho (sentido San José – Caldera), se observó la presencia de un macizo rocoso, el cual presenta características geomecánicas diferentes a los materiales presentados en la tabla anterior. Por este motivo a continuación se presenta la caracterización y clasificación de este material con la finalidad de incluirlo en el modelo general de la zona de estudio.



#### IV.2.2 Caracterización y clasificación del macizo rocoso próximo al estacionamiento 44+300

Debido a que próximo al sector del hundimiento se observó la presencia de un macizo rocoso, se consideró importante incluir este material en los análisis correspondientes, 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 modelo obtenido se presentará en la sección V, que se describirá más adelante.

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:

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

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

$m$ ,  $s$  y  $\alpha$  dependen de las propiedades y características del macizo rocoso y que se definen por las ecuaciones 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 5 muestra los valores típicos para diferentes tipos de roca que pueden utilizarse.

Tabla 5. 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 12.

<p><b>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA ROCAS FRACTURADAS</b> (Hoek y Marinos, 2000)</p> <p>Estimar el valor promedio del GSI para la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No intente 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		DECRESE LAS CONDICIONES SUPERFICIALES →				
		MUY BUENA Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas	BUENA Superficies rugosas, ligeramente intemperizadas, con pátinas de óxidos de hierro	REGULAR Superficies lisas, moderadamente intemperizadas y/o alteradas	MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos compactos o fragmentos angulares	MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos arcillosos blandos
<p><b>INTACTA O MASIVA.</b> Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas. Esp. 100cm</p>	150	90			N/A	N/A
<p><b>BLOCOSA.</b> Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades. Esp. 30cm</p>	80	80				
<p><b>MUY BLOCOSA.</b> Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades. Esp. 10cm</p>	40	70	60			
<p><b>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA</b> Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación o esquistocidad. Esp. 3cm</p>	20		50	40		
<p><b>DESINTEGRADA.</b> Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados Esp. 1cm</p>	5			30		
<p><b>LAMINADA/ CIZALLADA.</b> Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistocidad o planos de cizalla</p>	2			20		10
		N/A	N/A			

Figura 12. Caracterización de un macizo rocoso fracturado en función de la trabazón del macizo y las condiciones de sus discontinuidades



De esta manera, a partir de la visita en campo fue posible realizar una evaluación de la condición del macizo rocoso, la cual se muestra en la Figura 13, donde se puede notar una estructura conformada por una gran cantidad de bloques angulares de muchas familias de discontinuidades y con una gran persistencia de los planos de estratificación. Por su parte, las discontinuidades presentan una condición mala, con superficies lisas y cizalladas, intemperizadas con rellenos compactos o fragmentos angulares. De forma tal, que se puede estimar un valor promedio del GSI en un rango entre 25 y 35, por lo cual, para efectos de los análisis se empleó un valor de **GSI igual a 30**.



Figura 13. Condición del macizo rocoso observado en las proximidades del km 44+300 de la Ruta Nacional 27

Como se mencionó anteriormente, la región donde se encuentra la zona de estudio pertenece a la formación Grifo Alto, donde según Ruiz *et al.* (2015) los materiales presentes corresponden a andesitas, por lo que según lo observado en la Tabla 5, corresponde un valor de  $m_i = 18,9$ .

Para tener en consideración el grado de perturbación del macizo debido a los daños por voladura y relación tensional, el criterio generalizado de Hoek y Brown define un parámetro adicional llamado *factor de disturbación*,  $D$ . Este varía desde 0 para macizos rocosos sin disturbación in situ, a 1 para macizos rocosos muy perturbados. Cabe resaltar que el factor  $D$  se aplica solo a la zona dañada por voladuras o con relajación tensional y no debe ser aplicado a todo el macizo rocoso, ya que puede dar lugar a resultados erróneos 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  $D=1,0$ .



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

IV.2.3 Modelo geotécnico considerado para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

Para la realización de la simulación tridimensional preliminar de la estabilidad de taludes próximos al río Salitral en el km 48+000 de la Ruta Nacional 27, se procedió a analizar la información existente sobre los modelos geotécnicos existentes para la zona de estudio. Inicialmente, se utilizó como base el plano de la vista en elevación incluida en los planos estructurales que se muestra en el informe LM-PI-UP-PC05-2013, elaborado por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del LanammeUCR (ver Figura 14). Como se puede observar, en esta figura se muestra la estratigrafía y una descripción general de los materiales encontrados en las perforaciones. Para efectos del modelo utilizado para los análisis que se presentarán más adelante, fueron adoptadas las descripciones y espesores de capas correspondientes a la Perforación T-3.

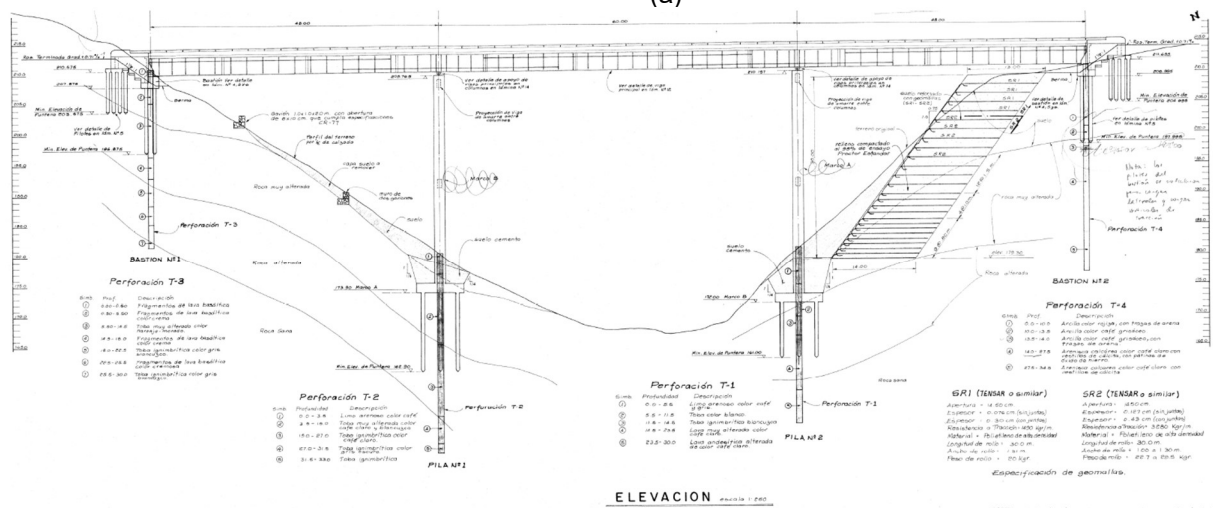
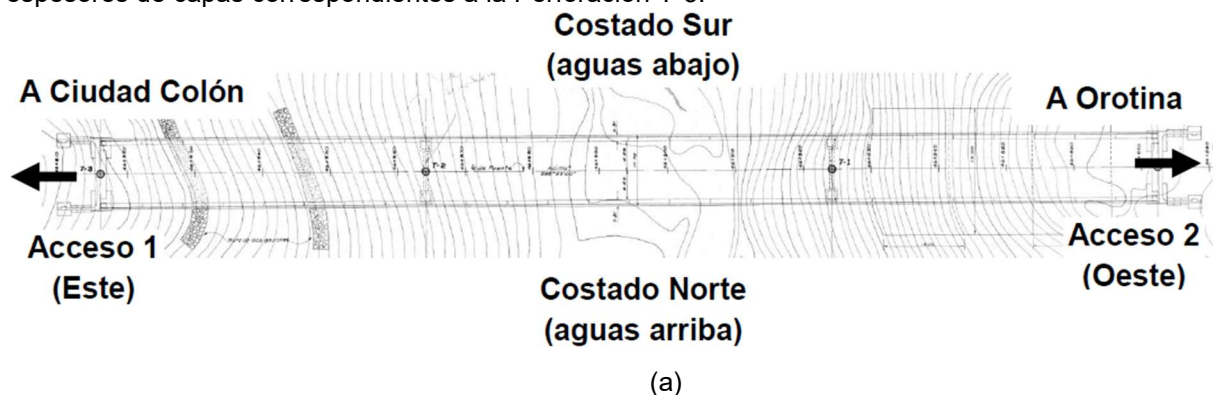






Figura 14. Información general del puente sobre el río Salitral a) vista en planta, b) vista en elevación del puente incluida en los planos estructurales y espesores de capas adoptados (Fuente: Informe LM-PI-UP-PC05-2013)

No obstante, es necesario destacar que la información existente no posee datos concernientes con los parámetros geomecánicos de los materiales del sitio. En este sentido, es necesario recordar que para obtener una adecuada caracterización geomecánica de los suelos y rocas, es necesario diseñar y realizar una campaña de exploración geotécnica pertinente para conocer las características de los materiales y las variaciones que pueden sufrir en su comportamiento ante lluvia u otros factores externos.

Debido a lo anterior y, por la proximidad de la zona de estudio con la caracterización de materiales del estacionamiento 44+300 de la Ruta Nacional 27, los cuales corresponden a materiales dentro de la misma formación geológica, se consideró nuevamente la información existente en el informe #2515-20\_rev2 del 14 de enero del 2021 elaborado por INSUMA SA. Así pues, utilizando esta información y con base en el criterio geotécnico de los profesionales especialistas del Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR se estableció un modelo geotécnico del sitio para poder utilizarlo en los análisis de estabilidad. Los parámetros de resistencia de las capas que se muestran en Tabla 6, cuyos valores fueron adaptados de los mostrados en el informe #2515-20\_rev2 del informe de INSUMA, se consideran como valores conservadores y, con base en la Figura 14, se determinó un espesor promedio para las capas de 6 y 12 m para la Capa\_1a y Capa\_3, respectivamente.

Tabla 6. Parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 (Fuente: Adaptado del informe #2515-20\_rev2 elaborado por INSUMA)

Material	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción, $\phi$ (°)
Capa_1a	20	5	30
Capa_3	20	100	30
Capa_4	22	100	35

Vale la pena resaltar que en el informe #2515-20\_rev2 elaborado por INSUMA SA se presentan los parámetros de resistencia adoptados para un material denominado como Capa\_2, el cual corresponde a parámetros de resistencia residuales en la superficie de falla determinada en el estacionamiento 44+300. No obstante, debido a las características del sitio en el estacionamiento 48+000, las características y la presencia de esta capa no fue tomada en consideración en los análisis que se presentan a continuación.

## V. Comprobación de estabilidad de los taludes

### V.1 Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)

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

- No se incluye un análisis de deformaciones



- La base de cálculo considera un equilibrio estático de fuerzas estáticas. Sin embargo, una vez que se genera la falla, el modelo deja de ser aplicable, puesto que la geometría de análisis cambia, y comienza a darse un movimiento de la masa de suelo, con el cual se deja de tener un equilibrio estático
- Se supone una distribución uniforme de esfuerzos en la base de los elementos o dovelas

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

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

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

De esta manera, teniendo en consideración las zonas de análisis de estabilidad de taludes en la Ruta Nacional 27, se utilizaron los Modelos de Elevación Digital (MED) obtenidos con la ayuda del VANT, los parámetros y propiedades de los materiales estimados anteriormente y el uso de un software especializado se llevaron a cabo análisis de estabilidad de taludes. La Figura 15 muestra el modelo de elevación en el estacionamiento 44+300 y la Figura 16 muestra el Modelo de elevación para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000, ambos MEDs levantados por el VANT, donde la escala de colores representa las elevaciones del terreno, donde los colores azules representan los puntos con mayores alturas, el color verde alturas intermedias y los colores rojos los puntos más bajos.

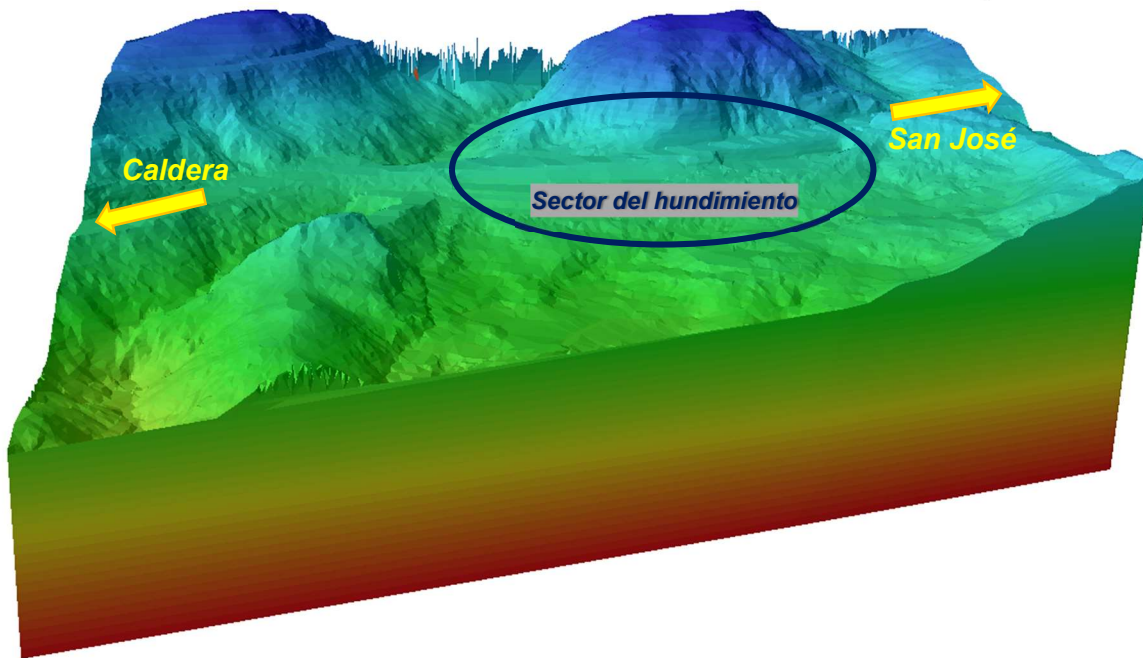


Figura 15. Modelo de elevación en el estacionamiento 44+300 de la Ruta Nacional 27 utilizado en el software de estabilidad de taludes

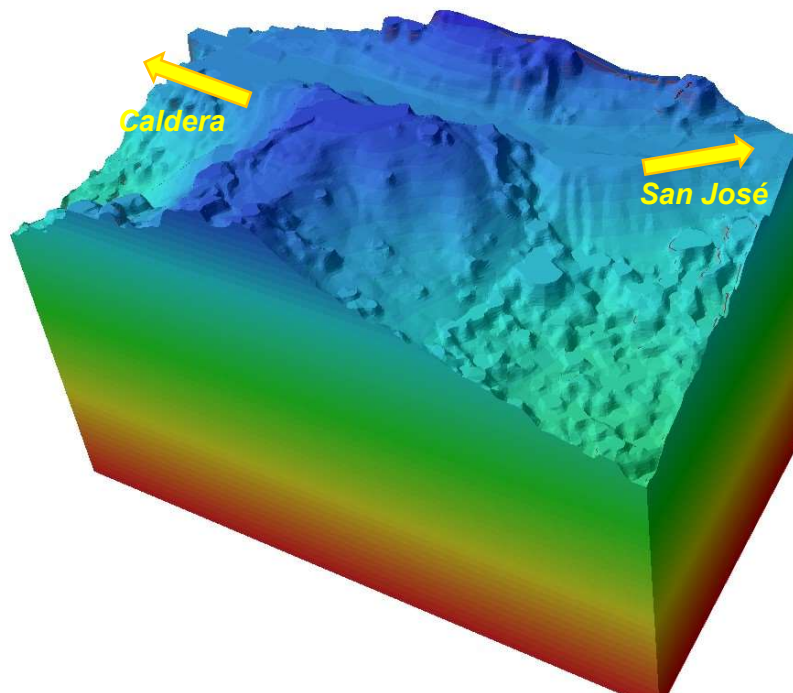


Figura 16. Modelo de elevación para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 utilizado en el software de estabilidad de taludes



El objetivo de estos análisis de estabilidad es obtener un factor de seguridad a partir de metodologías de análisis de equilibrio límite. De acuerdo con las recomendaciones establecidas en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR), se considera para el sitio de estudio el riesgo de pérdidas humanas en un nivel bajo, debido a que la empresa concesionaria mantiene un monitoreo constante y ha procurado la asesoría de diversas empresas consultoras y especialistas en geotecnia para obtener propuestas de soluciones que garanticen la estabilidad de los taludes y la seguridad de los usuarios; para el riesgo de daños económicos y ambientales en un nivel medio, puesto que esta ruta presenta otras rutas redundantes (por ejemplo la Ruta Nacional 1 – Cambronero, o bien la Ruta Nacional 3 – Aguacate) para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,30 en condición estática. Se considera la condición de sismo (pseudo-estática) utilizando el coeficiente de aceleración del suelo de 0,15 g definido en el CGTLCR para el sitio ubicado en Zona III con tipo de suelo S3-S4 > 1,0.

Es importante indicar que los resultados que se muestran en el presente informe no representan los resultados definitivos de esta región ya que el estudio completo correspondiente, considerando una campaña de exploración geotécnica profunda de la zona, debe ser realizada por el profesional en geotecnia designado como responsable del análisis y propuestas de implementación de obras de estabilidad de taludes. Sin embargo, constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que puede sufrir la carretera en este sector.

Del análisis de la información y criterio geotécnico fue posible establecer el modelo geotécnico del estacionamiento 44+300 a utilizar en los análisis de estabilidad, que se puede resumir en lo que se presenta en la

Tabla 8 y la Figura 17. Dicho modelo es un modelo relativamente simple, puesto que se está considerando un espesor uniforme de las capas intermedias, adicionalmente, únicamente se está considerando la presencia de un macizo rocoso fracturado próximo al sector del hundimiento. Por lo que, análisis más rigurosos pueden considerar otras regiones montañosas próximas al sector del estacionamiento 44+300 como macizos rocosos con propiedades geomecánicas diferentes, así como también, la presencia de otros tipos de materiales y espesores.

Tabla 7. Modelo geotécnico del estacionamiento 44+300

Material	Profundidad aproximada (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción, $\phi$ (°)	UCS (kPa)	GSI	mi	D
Capa_1a	0-15	20	5	30	-	-	-	-
Capa_2	15-27	17	0	18	-	-	-	-
Capa_3	27-45	20	100	30	-	-	-	-
Capa_4	>45	22	100	35	-	-	-	-
Roca	Sobre la Capa_2	20	-	-	75600	30	18,9	1

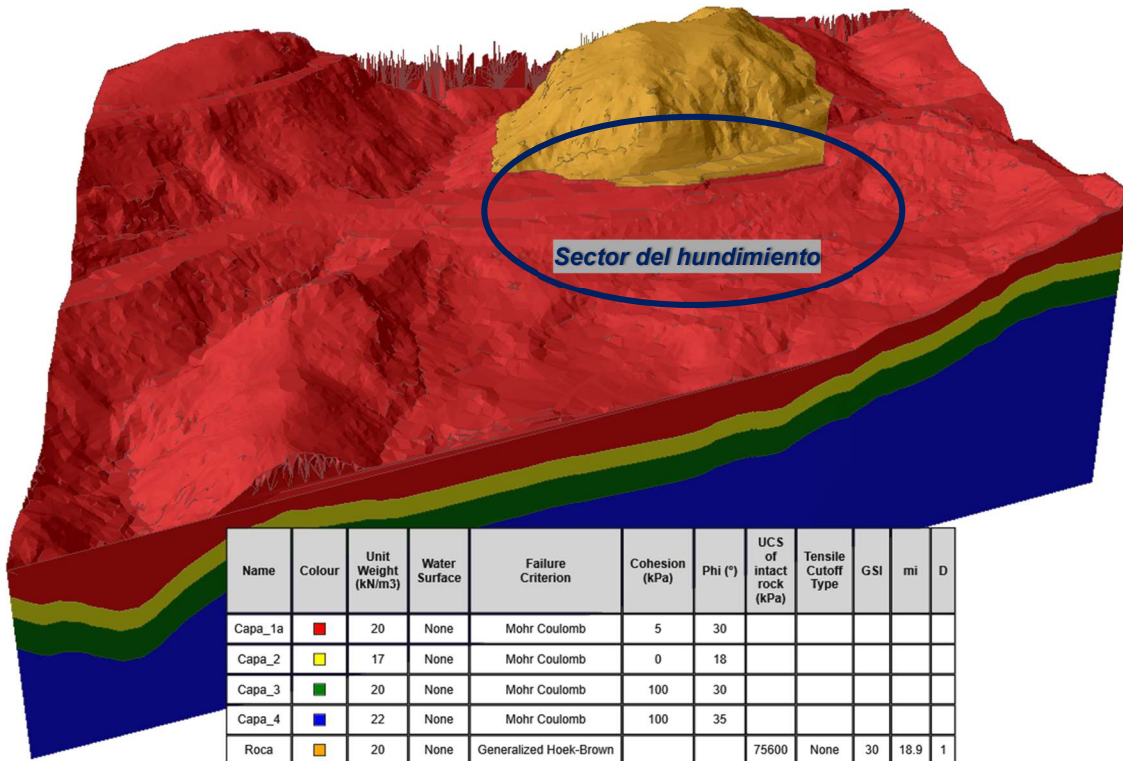


Figura 17. Modelo geotécnico y parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad tridimensional utilizado en el software de estabilidad de taludes del estacionamiento 44+300

En el caso del sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 la Tabla 8 y la Figura 18 muestra el modelo geotécnico considerado en los análisis de estabilidad tridimensional utilizado en el software de estabilidad de taludes.

Tabla 8. Modelo geotécnico para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

Material	Profundidad aproximada (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción, $\phi$ (°)
Capa_1a	0-6	20	5	30
Capa_3	6-18	20	100	30
Capa_4	>18	22	100	35

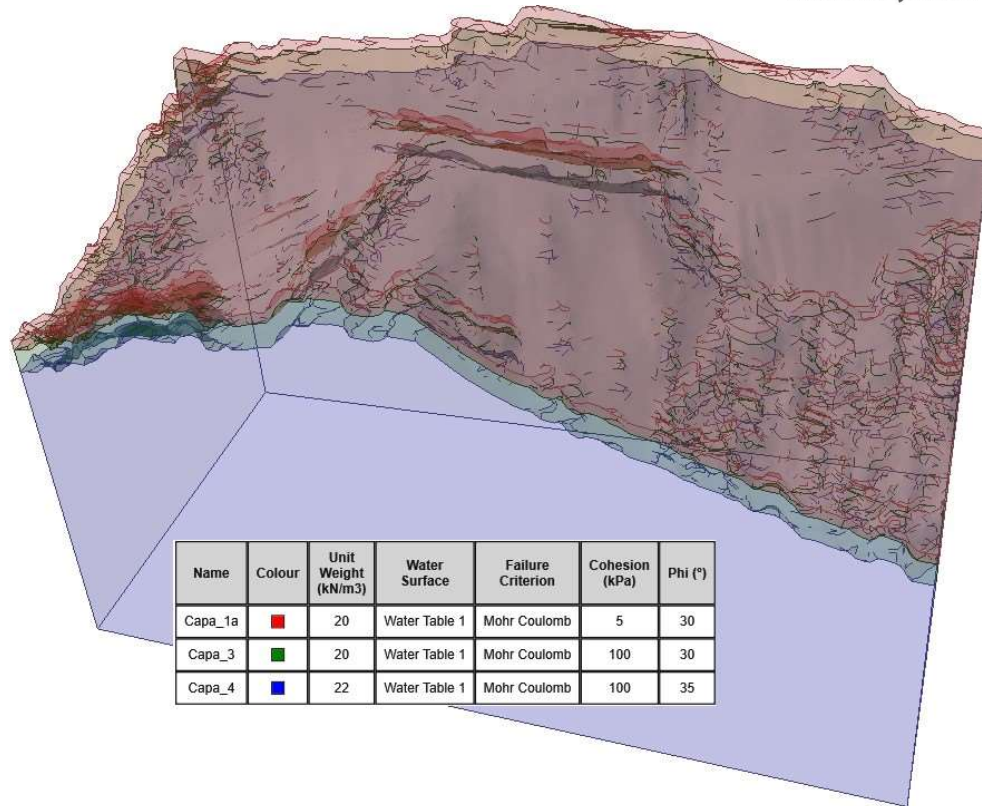


Figura 18. Modelo geotécnico y parámetros geomecánicos considerados en los análisis de estabilidad tridimensional utilizado en el software de estabilidad de taludes para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

#### V.1.1.1 Sector del estacionamiento 44+300

En la Figura 19 se muestran los mapas de los factores de seguridad y la escala de colores correspondiente para la apropiada interpretación de los mapas sobre la superficie analizada para la condición estática y pseudo-estática utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop. El color rojo representa las zonas donde los factores de seguridad son inferiores a los valores mínimos recomendados de 1,3 y 1,0, para las condiciones estáticas y pseudo-estáticas, respectivamente, según el CGTLCR. El color verde, representa valores de factores de seguridad que no representan riesgo de pérdidas humanas, ni riesgo de daños económicos y ambientales. Los colores amarillos, valores intermedios que se encuentran dentro los valores mínimos admisibles por el CGTLCR. La Figura 20 muestra los mapas correspondientes al uso de la metodología de equilibrio límite de Morgenstern-Price. Se analizaron los casos de una condición seca y una condición donde se considera la presencia de un nivel freático a una profundidad de 6m respecto a la superficie del terreno, esto con la finalidad de evaluar la influencia que tiene la presencia de agua en las condiciones de estabilidad de la zona de análisis. Adicionalmente, en ambas figuras se muestra una línea punteada que representa la superficie de falla observada in situ por la UGERVN en el informe INF-PI-UGERVN-12-2020.

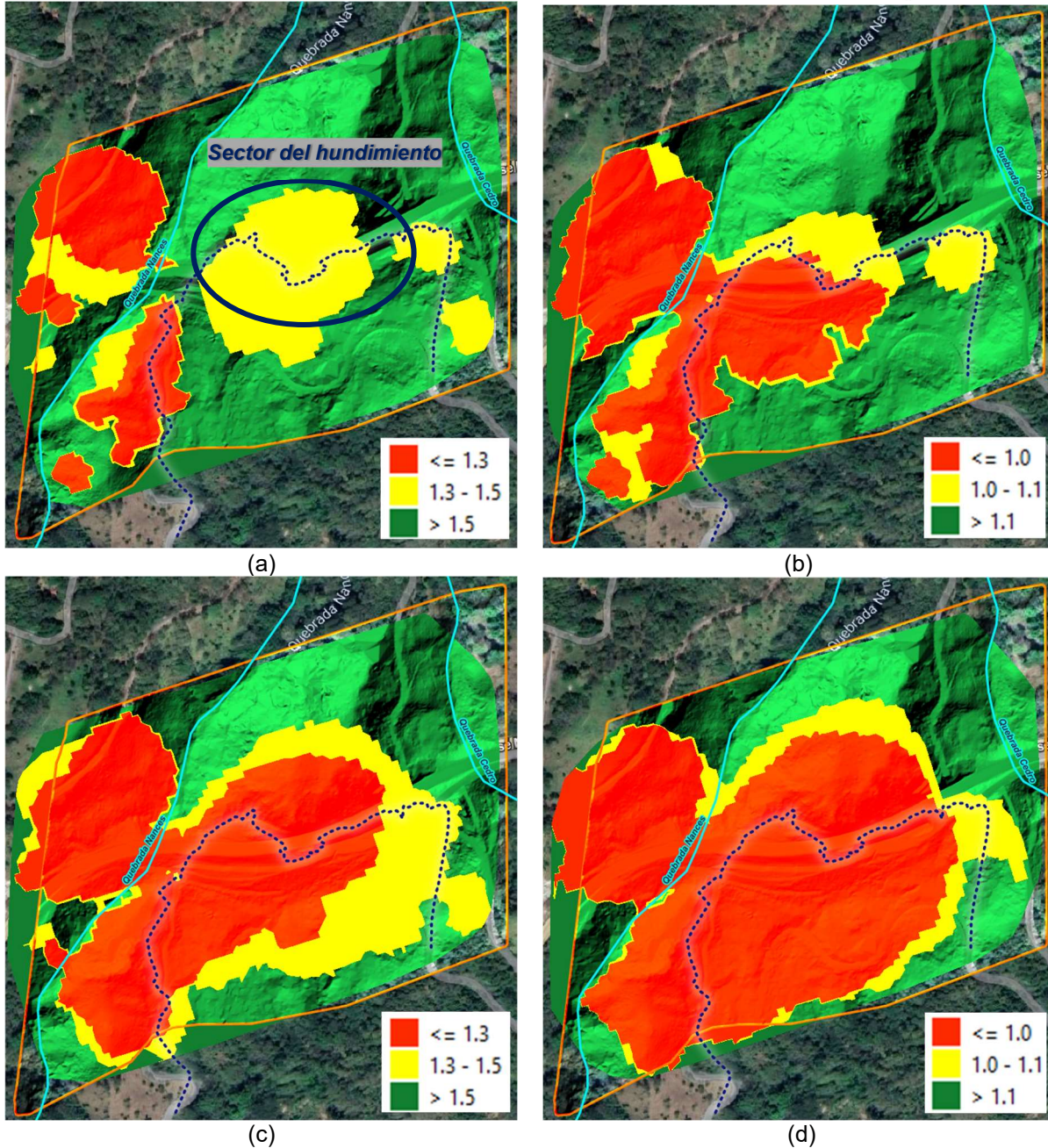


Figura 19. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software de estabilidad de taludes en el sector del estacionamiento 44+300 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática

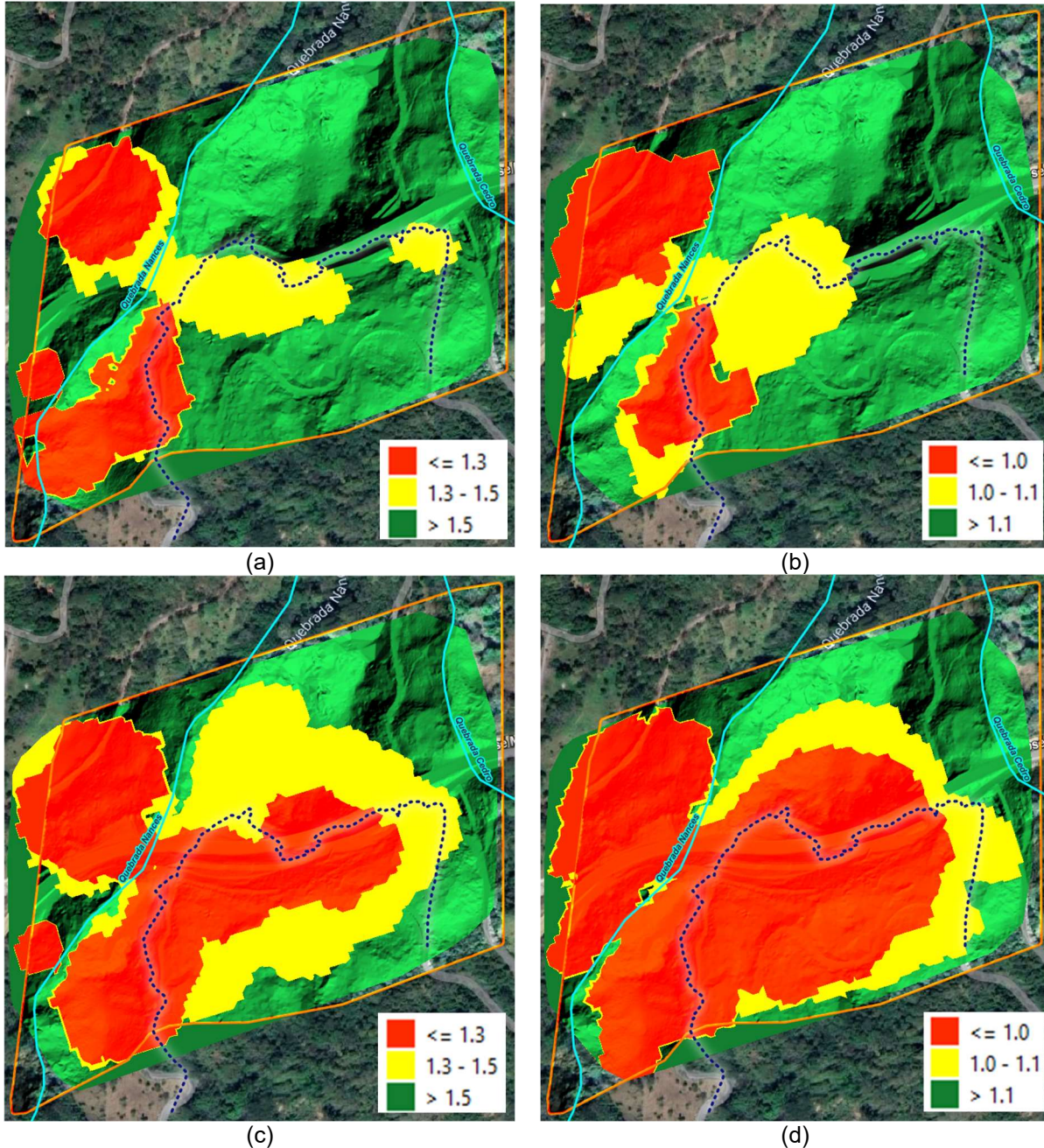


Figura 20. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Morgenstern-Price en el software de estabilidad de taludes en el sector del estacionamiento 44+300 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática

Como se puede observar los factores de seguridad más bajos presentan una buena correspondencia con la zona de la superficie de falla observada en sitio por la UGERVN en el informe INF-PI-UGERVN-12-2020, adicionalmente se observa que la presencia de un nivel freático conlleva a una reducción de los factores de seguridad y un incremento de las áreas o regiones donde se pueden presentar deslizamientos (por ejemplo, comparando las Figura 19a) y b) con las Figura 19c) y d), respectivamente), lo cual demuestra que la presencia de agua afecta de manera considerable las condiciones de





estabilidad de la zona de análisis y que coincide con las observaciones vistas en campo. Adicionalmente, se puede notar que la consideración de los efectos sísmicos en los análisis pseudo-estáticos también involucra una reducción de los factores de seguridad y un incremento de las áreas o regiones donde se pueden presentar deslizamientos (por ejemplo, comparando las Figura 20a) y c) con las Figura 20b) y d), respectivamente).

#### V.1.1.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

De manera similar la Figura 21 muestra los mapas de los factores de seguridad y la escala de colores correspondiente de los factores de seguridad utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el estacionamiento 48+000. La Figura 22 muestra los mapas correspondientes al uso de la metodología de equilibrio límite de Morgenstern-Price. Nuevamente, el color rojo representa las zonas donde los factores de seguridad son inferiores a los valores mínimos recomendados, según el CGTLCR. El color verde, representa valores de factores de seguridad que no representan riesgo de pérdidas humanas, ni riesgo de daños económicos y ambientales y los colores amarillos, valores intermedios.

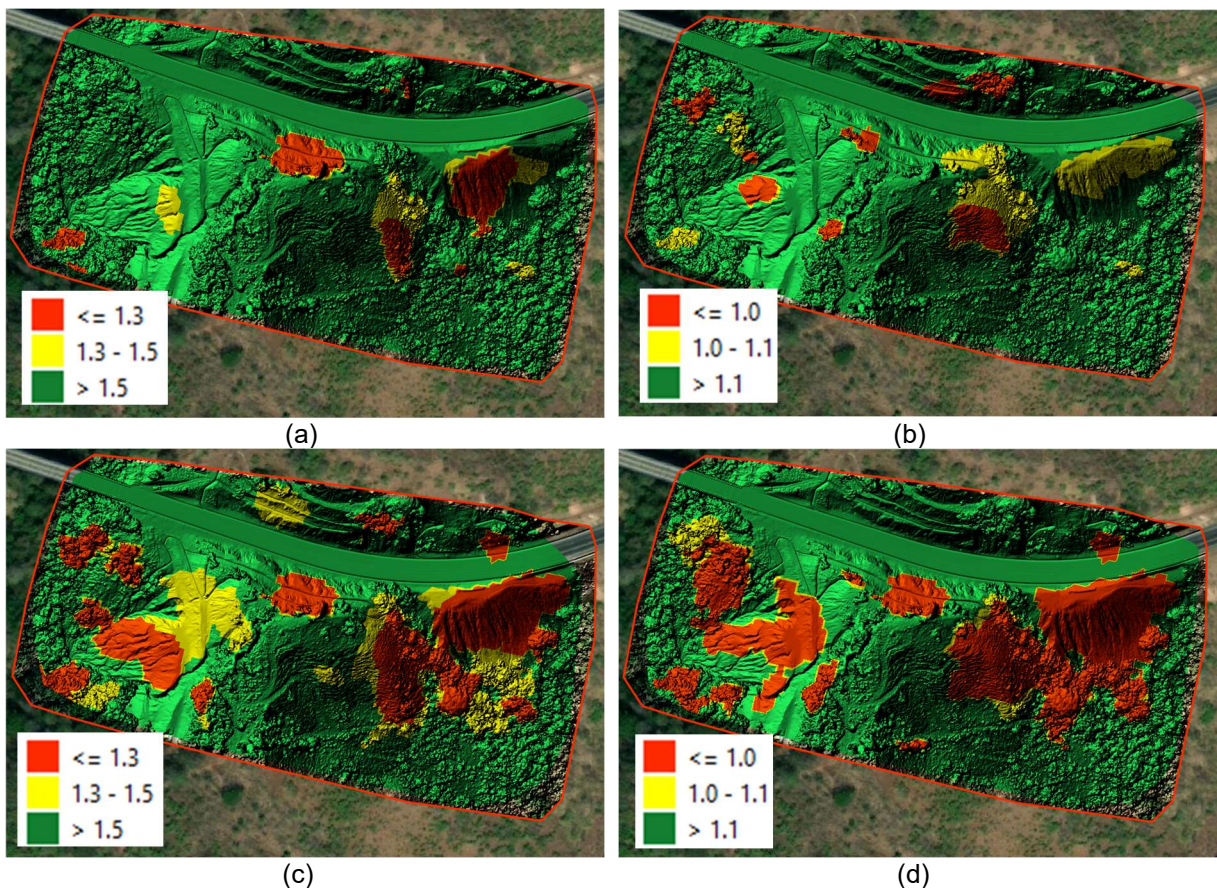


Figura 21. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software de estabilidad de taludes para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática

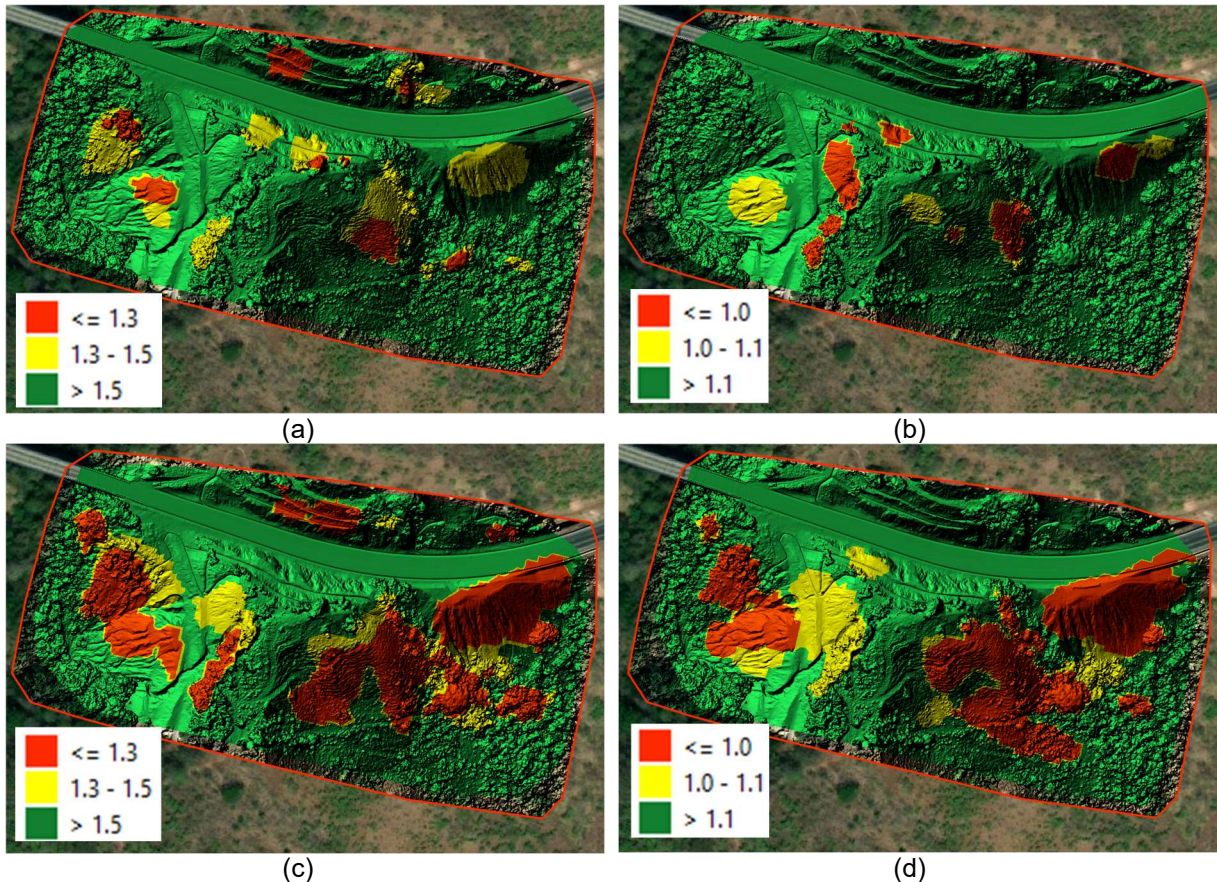


Figura 22. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Morgenstern-Price en el software de estabilidad de taludes para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática

En este caso, se analizó una condición seca y una condición extrema de la presencia de un nivel freático, donde se consideran los suelos totalmente saturados. Por otro lado, no fueron considerados en los análisis ningún tipo de obra de contención en la zona de estudio. Estas condiciones de evaluación, a criterio de los autores, son representativas de las condiciones observadas en sitio, donde en general no fueron observados sistema de recolección, canalización y manejo de las aguas pluviales y de escorrentía superficial. No obstante, cualquier otra condición que se pueda considerar crítica, así como también, el análisis de superficies de ruptura no circulares deberá ser analizada por el ingeniero responsable designado. Sin embargo, los resultados obtenidos constituyen un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones en las estructuras vecinas al sitio donde se presentaron los problemas de estabilidad.

Como se puede observar la presencia de un nivel freático conlleva a una reducción de los factores de seguridad y un incremento de las áreas o regiones donde se pueden presentar deslizamientos (por ejemplo, comparando las Figura 21 a) y b) con las Figura 21 c) y d), respectivamente), lo cual demuestra que la presencia de agua afecta de manera considerable las condiciones de estabilidad de la zona de análisis y que coincide con las observaciones vistas en campo. Adicionalmente, se puede notar que la consideración de los efectos sísmicos en los análisis pseudo-estáticos también involucra una reducción de los factores de seguridad y un incremento de las áreas o regiones donde se pueden presentar deslizamientos (por ejemplo, comparando las Figura 21 a) y c) con las Figura 21 b) y d), respectivamente).



Cabe destacar que estos análisis consideran la condición de la topografía actual del terreno, y por lo tanto no se están considerando la colocación de ninguna actividad de estabilización de los taludes. Adicionalmente es importante resaltar nuevamente que todos los análisis se ejecutaron bajo la suposición de un espesor uniforme de las capas intermedias, por lo que se sugiere que, para la obtención de los resultados definitivos, ampliar la información disponible y llevar a cabo un estudio de la estratigrafía del suelo, acompañada de una mayor exploración geotécnica in situ y cantidad de ensayos de laboratorio a cargo del profesional en geotecnia especializado que se designe para tal efecto.

## V.2 Análisis de secciones transversales utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en dos dimensiones (2D)

### V.2.1 Sector del estacionamiento 44+300

Continuando con el proceso, para análisis más específicos de estabilidad de taludes se realizó la modelación de las tres secciones transversales que se muestran en la Figura 23. El objetivo de estos análisis fue considerar de una forma más detallada la estabilidad de taludes en secciones de interés relacionadas con el comportamiento observado en campo. Estas secciones se localizan dentro de los sectores definidos en el Informe #2515-20\_rev2 elaborado por INSUMA, los cuales corresponden a:

- **Sección 1 – De Pk 44+260 a Pk 44+360:** Relleno a media ladera, con espesores de hasta 5 – 6 m a lo largo del eje de la Carretera, pero con espesores que pueden llegar a ser de hasta 15 m
- **Sección 2 – De Pk 44+360 a Pk 44+400:** Tramo de poca longitud donde se realizó un corte a través de rocas (lavas) de buenas características mecánicas pero fracturadas. Hacia la margen izquierda de la Carretera y hacia el final de la construcción de la vía (en el año 2009) se había colocado material de botadero que no forma parte del trazado de la vía y que fue removido posteriormente
- **Sección 3 – De Pk 44+400 a Pk 44+540:** Tramo de relleno con espesores importante de hasta 30 m a lo largo del eje de la Carretera

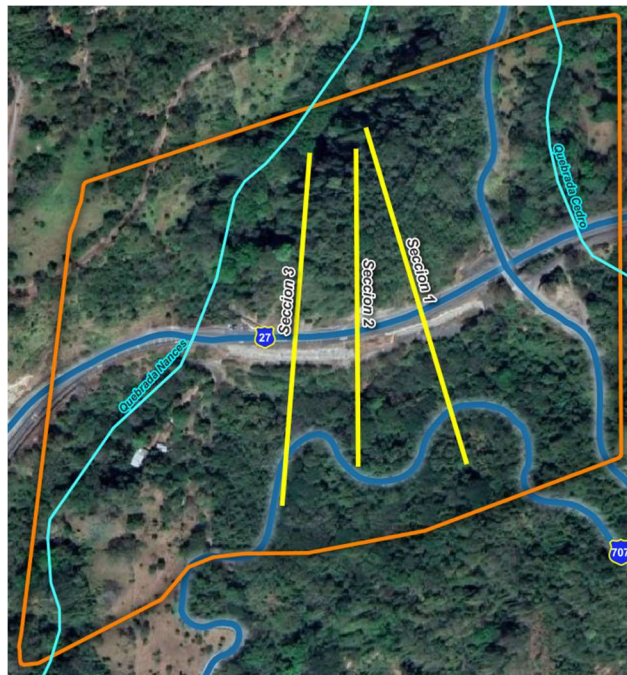


Figura 23. Secciones transversales analizadas en dos dimensiones en el sector del estacionamiento 44+300



A continuación, en la Figura 24, se muestran los resultados obtenidos para una de las secciones analizadas correspondiente a la Sección 1, tanto en la condición seca, como en la condición crítica, es decir, considerando la presencia del nivel freático, en las condiciones estáticas y pseudo-estáticas. Para esta última se considera un factor de aceleración efectiva horizontal de 0,15 g determinado en apartados anteriores. En la Tabla 9 se muestra un resumen de los resultados obtenidos con los métodos de Bishop y Morgenstern-Price, cuyos valores son comparados con los recomendados en el CGTLCR, para todas las condiciones y secciones analizadas.

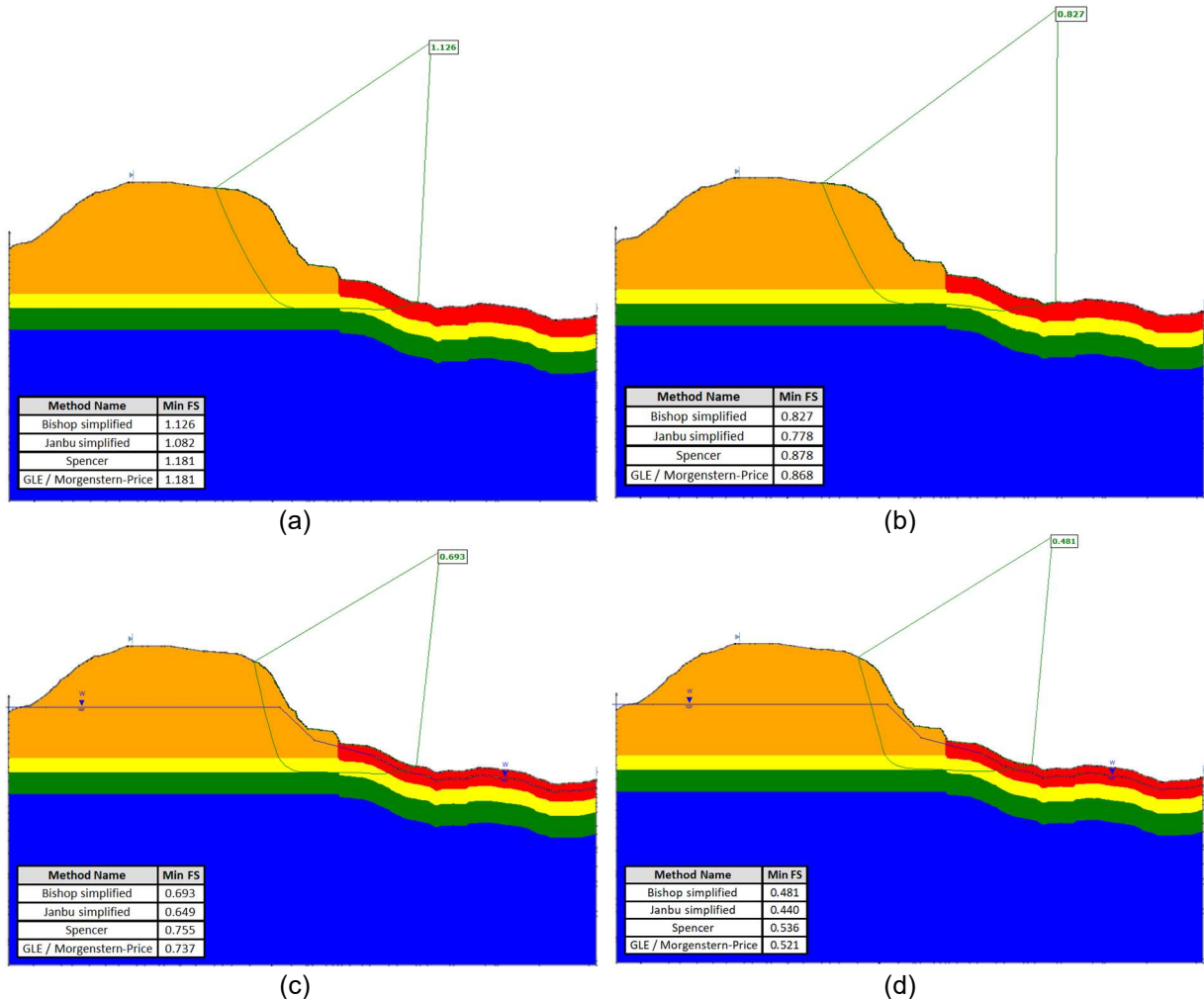


Figura 24. Factores de seguridad obtenidos en simulaciones bidimensionales en el software de estabilidad de taludes en la sección transversal correspondiente al Sección 1 en el sector del estacionamiento 44+300 para: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática

Como se observa en la Tabla 9 los resultados los factores de seguridad obtenidos para todas las secciones y condiciones analizadas se encuentran por debajo de los valores mínimos recomendados por el CGTLCR, lo cual sugiere desde el punto de vista del MEL desempeños inadecuados de los taludes bajo la composición y condiciones supuestas de análisis indicadas en este informe. Lo anterior podría considerarse contradictorio a los resultados obtenidos en el análisis en 3D que se presentó anteriormente, donde los valores de los FS fueron superiores al valor de 1,3 y 1,1 en las condiciones



estáticas y pseudo-estáticas en estado seco. No obstante, es importante resaltar que, en ocasiones, este comportamiento puede ser esperado, puesto que la geometría tridimensional del terreno puede favorecer la obtención de factores de seguridad más altos, o en algunos casos, hasta podrían obtenerse FS menores, de ahí la importancia de realizar ambos análisis y aplicar el apropiado criterio técnico del ingeniero geotecnista responsable designado para esta revisión para establecer el valor más adecuado.

Tabla 9. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en las diferentes secciones analizadas

Sección	Condición	Método de análisis		CGTLCR
		Bishop simplificado	GLE/Morgenstern-Price	
Estático	Seca	1	1,126	1,3
		2	0,941	
		3	1,100	
	Saturada	1	0,693	
		2	0,520	
		3	0,757	
Pseudo-estático	Seca	1	0,827	1,0
		2	0,708	
		3	0,758	
	Saturada	1	0,481	
		2	0,383	
		3	0,543	

Es necesario indicar una vez más, que los resultados presentados corresponden a los resultados obtenidos bajo la composición y condiciones supuestas de análisis indicadas en este informe, las cuales no consideran ninguna de las obras de retención que se ha llevado a cabo en este sector, las cuales pueden permitir un aumento en los factores de seguridad. Estas últimas condiciones de evaluación, así como cualquier otra condición crítica deberá ser considerada por el ingeniero responsable asignado.

### V.2.2 Sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

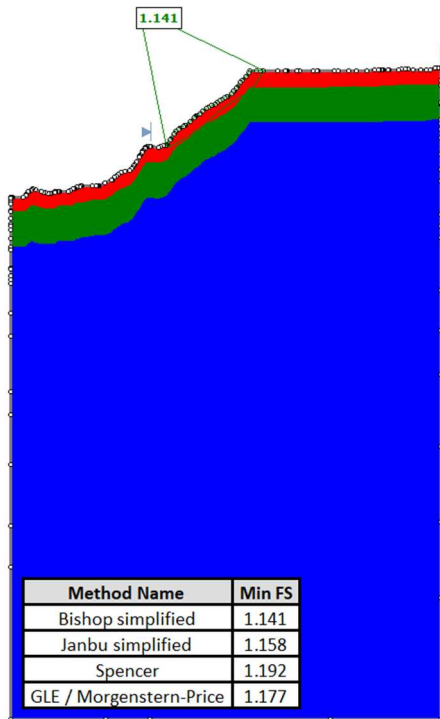
De manera similar para este sector, se realizaron análisis de estabilidad más específicos en seis secciones que se muestran en la Figura 25. El objetivo de estos análisis fue considerar de una forma más detallada la estabilidad de taludes en secciones de interés relacionadas con el comportamiento observado en campo. Estas secciones se localizan dentro de los sectores descritos en el apartado "II.1.1 Informes realizados en la zona comprendida entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000", los cuales corresponden a:

- **Carretera 1:** Sección transversal localizada en el estacionamiento 47+750, o bien, 250 metros antes (sentido San José – Caldera) del puente sobre el río Salitral, con la presencia de un relleno en el talud izquierdo (sentido San José – Caldera)
- **Carretera 2:** Sección transversal localizada aproximadamente 175 metros antes (sentido San José – Caldera) del puente sobre el río Salitral
- **Carretera 3:** Sección transversal localizada aproximadamente 140 metros antes (sentido San José – Caldera) del puente sobre el río Salitral, con la presencia de taludes de corte al lado izquierdo y derecho, con reportes históricos de problemas de estabilidad
- **Carretera 4:** Sección transversal localizada en el estacionamiento 47+900, con la presencia de un talud de corte al lado derecho (sentido San José – Caldera), con reportes históricos de problemas de estabilidad
- **Puente:** Sección transversal localizada en las proximidades del acceso 1 (Este) del puente sobre el río Salitral (ver Figura 14, mostrada anteriormente)
- **Deslizamiento:** Sección longitudinal al relleno en el talud izquierdo (sentido San José – Caldera) del estacionamiento 48+000 con reportes históricos de problemas de estabilidad

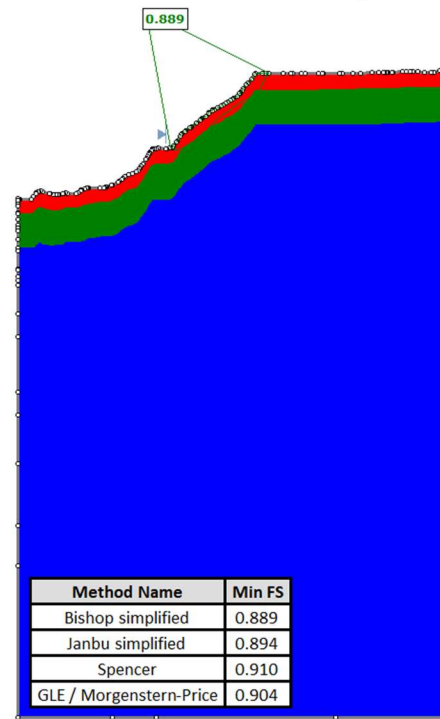


Figura 25. Secciones analizadas en dos dimensiones para el sector entre el estacionamiento 47+500 hasta el 48+000

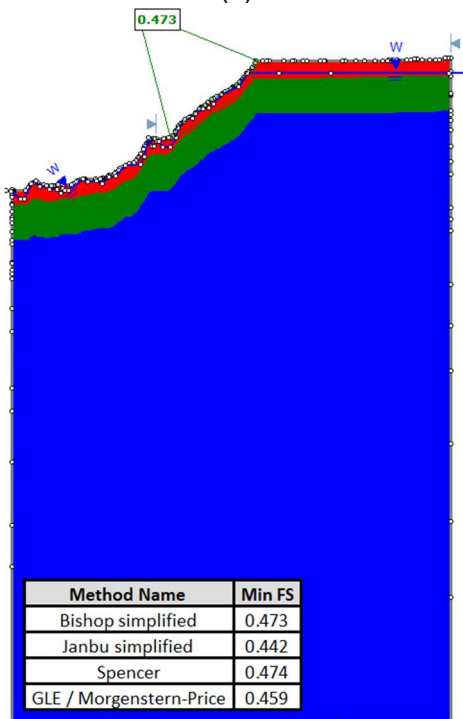
En la Figura 26 se muestran los resultados obtenidos para una de las secciones analizadas correspondiente a la sección transversal definida como Puente (localizada en las proximidades del acceso 1 (Este) del puente sobre el río Salitral), tanto en la condición seca como en la condición crítica, es decir, considerando la presencia del nivel freático, en las condiciones estáticas y pseudo-estáticas. Por su parte la Figura 27, muestra los resultados para la sección definida como Carretera 1. En ambos casos, para la condición pseudo-estática se considera un factor de aceleración efectiva horizontal de 0,15 g determinado en apartados anteriores. En la Tabla 10 se muestra un resumen de los resultados obtenidos con los métodos de Bishop y Morgenstern-Price, cuyos valores son comparados con los recomendados en el CGTLCR, para todas las condiciones y secciones analizadas.



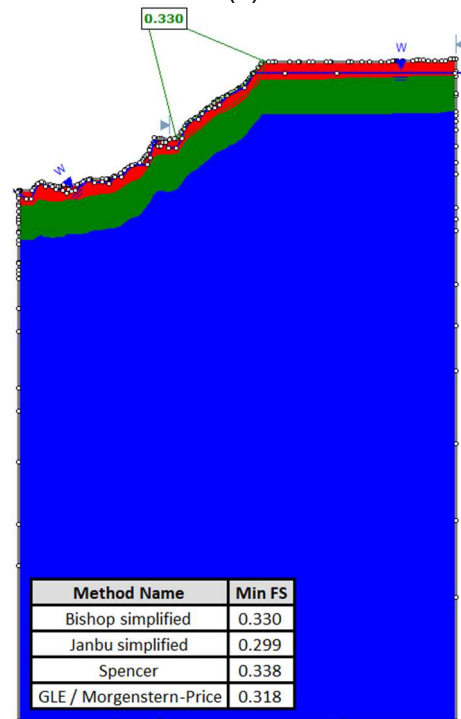
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 26. Factores de seguridad obtenidos en simulaciones bidimensionales en el software de estabilidad de taludes en la sección definida como Puente, localizada en las proximidades del acceso 1 (Este) del puente sobre el río Salitral, para diferentes condiciones: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática

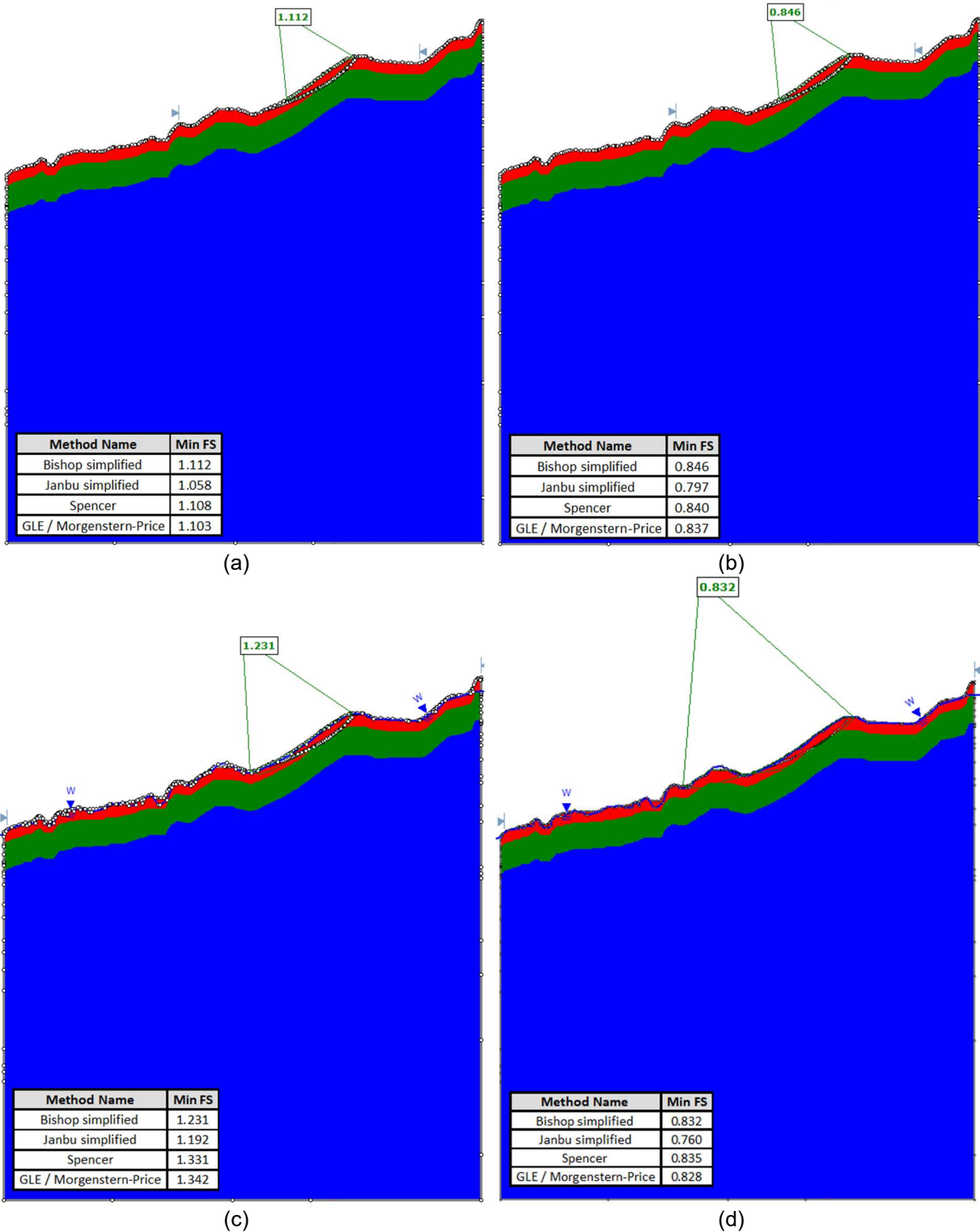


Figura 27. Factores de seguridad obtenidos en simulaciones bidimensionales en el software de estabilidad de taludes en la sección definida como Carretera 1, localizada aproximadamente 250 metros antes del puente sobre el río Salitral, para diferentes condiciones: a) condición seca y estática; b) condición seca y pseudo-estática; c) condición saturada y estática; d) condición saturada y pseudo-estática





Tabla 10. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en las diferentes secciones analizadas

	Sección	Condición	Método de análisis		CGTLCR
			Bishop simplificado	GLE/Morgenstern-Price	
Estático	Carretera 1	Seca	1,112	1,103	1,3
	Carretera 2		1,225	1,256	
	Carretera 3 LD		1,403	1,332	
	Carretera 3 LI		1,101	1,114	
	Carretera 4		1,146	1,179	
	Puente		1,141	1,177	
	Deslizamiento		1,442	1,457	
	Carretera 1	Saturada	1,231	1,342	
	Carretera 2		0,579	0,616	
	Carretera 3 LD		1,280	1,232	
	Carretera 3 LI		0,974	1,038	
	Carretera 4		0,917	0,972	
	Puente		0,473	0,459	
	Deslizamiento		0,850	0,898	
Pseudo-estático	Carretera 1	Seca	0,846	0,837	1,0
	Carretera 2		1,003	1,016	
	Carretera 3 LD		1,008	1,103	
	Carretera 3 LI		0,860	0,859	
	Carretera 4		0,902	0,910	
	Puente		0,889	0,904	
	Deslizamiento		1,076	1,113	
	Carretera 1	Saturada	0,832	0,828	
	Carretera 2		0,441	0,488	
	Carretera 3 LD		1,017	0,972	
	Carretera 3 LI		0,789	0,803	
	Carretera 4		0,713	0,725	
	Puente		0,330	0,318	
	Deslizamiento		0,632	0,663	

Como se observa en la Tabla 10 los resultados los factores de seguridad obtenidos para todas las secciones y condiciones analizadas, en general se encuentran por debajo de los valores mínimos recomendados por el CGTLCR, lo cual sugiere desde el punto de vista del MEL desempeños inadecuados de los taludes bajo la composición y condiciones supuestas de análisis indicadas en este informe. Lo anterior podría considerarse contradictorio a los resultados obtenidos en el análisis en 3D que se presentó anteriormente, donde los valores de los FS, en muchos de los sectores y secciones analizadas, presentaron valores superiores a 1,3 y 1,1 en las condiciones estáticas y pseudo-estáticas en estado seco, respectivamente.

Nuevamente, las variaciones en los valores de los factores de seguridad, puede responder a la consideración de una geometría tridimensional del terreno, lo cual puede favorecer la obtención de factores de seguridad más altos, o en algunos casos, hasta podrían obtenerse FS menores. Por ello, un adecuado análisis y criterio técnico del ingeniero geotecnista designado para este análisis, es indispensable para establecer el valor más adecuado. Por su parte, es importante destacar que una de las ventajas de aplicar el análisis tridimensional está en que se facilita la identificación de los sectores específicos con factores de seguridad más bajos y que difícilmente podrían ser identificados por el ingeniero en campo.



Con relación a las secciones analizadas, los resultados de los análisis tridimensionales obtenidos indican que la sección del Puente presenta factores de seguridad adecuados con respecto a los valores mínimos recomendados por el CGTLCR, por su parte los análisis bidimensionales de esta misma sección sugieren que las posibles superficies de deslizamiento no representan riesgos directos a la estructura del puente.

En el caso de la sección denominada como Carretera 1, tanto los resultados obtenidos en los análisis bidimensionales como tridimensionales, indican que el talud izquierdo (sentido San José – Caldera), correspondiente al material de relleno o botadero, presenta factores de seguridad menores a los recomendados por el CGTLCR, especialmente cuando los materiales presentan condiciones saturadas, por lo cual se sugiere ampliar la campaña geotécnica y los análisis en este sector. Adicionalmente, mejorar en el corto y mediano plazo, las medidas de protección ante la escorrentía superficial y manejo de aguas superficiales y subterráneas en el talud, las cuales ya muestran en campo afectaciones importantes.

En la sección denominada como Carretera 2, los resultados de los análisis bidimensionales indican que el talud derecho (sentido San José – Caldera) presenta factores de seguridad menores a los recomendados por el CGTLCR, especialmente cuando los materiales presentan condiciones saturadas, por lo cual se sugiere implementar y mejorar las medidas de protección ante la escorrentía superficial y manejo de aguas superficiales del talud en el corto y mediano plazo.

En el caso del talud izquierdo (sentido San José – Caldera) de la sección denominada como Carretera 3 y el talud derecho (sentido San José – Caldera) de la sección denominada como Carretera 4, los resultados de los análisis bidimensionales y tridimensionales muestran factores de seguridad menores a los recomendados por el CGTLCR, especialmente cuando los materiales presentan condiciones saturadas, por lo que nuevamente se sugiere, implementar y mejorar las medidas de protección ante la escorrentía superficial y manejo de aguas superficiales del talud, así como también ampliar la campaña geotécnica y los análisis en estos sectores con la finalidad de establecer si se requiere la construcción de obras de retención adicionales.

Finalmente, en la sección denominada como Deslizamiento, los resultados de los análisis bidimensionales y tridimensionales también muestran factores de seguridad menores a los recomendados por el CGTLCR tanto para las condiciones secas como saturadas. Sin embargo, por su ubicación, el análisis tridimensional sugiere que las posibles afectaciones del volumen que puede deslizarse no representan un daño potencial en la carretera de la Ruta Nacional 27, no obstante, los resultados indican que el material podría deslizarse en dirección hacia el cauce del río Salitral, lo que representa afectaciones desde el punto de vista medioambiental.

Adicionalmente, es necesario indicar una vez más, que los resultados presentados deben ser refinados por el ingeniero geotecnista responsable y asignado a este proyecto, así como también, es responsabilidad de este ingeniero considerar cualquier otra circunstancia crítica que pueda darse en las zonas de estudio.

Una vez realizados los análisis de estabilidad de taludes, para determinar los factores de seguridad, por los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), es importante mencionar que el supuesto fundamental de estos métodos es que la falla ocurre por deslizamiento de un bloque o masa de suelo a lo largo de una superficie de deslizamiento. Así pues, teniendo en consideración algunas de las limitaciones que se mencionaron anteriormente, se sugiere a la Administración incluir a los análisis anteriores, el uso del Método de Elementos Finitos (MEF) y la consideración de una campaña de exploración geotécnica de mayor extensión, para así poder contar con los insumos necesarios y suficientes para determinar con mayor precisión la condición de estabilidad de la zona y el diseño de obras de estabilización, en caso de ser requerido.



En el caso de los MEF, el problema se divide en formas geométricas simples o elementos, interconectados entre sí, para resolver de forma aproximada el conjunto. La principal ventaja de este método está en que es posible considerar las relaciones esfuerzo-deformación, por lo que una ruptura no se presenta de forma instantánea, sino que es considerado como un proceso continuo y gradual. La aplicación de estas técnicas en el pasado estaba limitada por el elevado costo computacional y tiempos de cálculo requerido. No obstante, con los avances en las velocidades de cálculo, estas limitaciones han sido superadas con el uso de las computadoras personales. Con ello es posible estimar el estado de esfuerzos, las deformaciones y el flujo de agua en el terreno, lo que permite que la superficie crítica de deslizamiento se genere automáticamente durante el proceso su proceso de cálculo y su forma (recta, poligonal, circular, espiral logarítmica, entre otros) se produzca espontáneamente sin que sea necesario predeterminarla al iniciar el proceso de cálculo.

De esta forma, el análisis de taludes abarca mucho más que determinar su estabilidad, sino que también permite estimar los riesgos de movimientos de la ladera y estimar los parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración. Con lo cual es posible diseñar y analizar diferentes métodos de excavación, así como permitir observar la distribución de esfuerzos y las deformaciones que puede sufrir el talud. De esta manera, sería posible realizar e incluir un análisis de deformaciones en los taludes y sectores próximos a éstos, especialmente carreteras cercanas de la corona del talud de corte, con la finalidad de evaluar las posibles afectaciones que puede sufrir la vía debido a las deformaciones por la redistribución de los esfuerzos in situ.

## VI. Levantamiento de la condición de otros taludes

Con la finalidad de evaluar la condición actual de otros taludes, se utilizó una herramienta de inventario de taludes que forma parte de la “Guía para el uso de la herramienta para evaluación de condición de taludes” elaborada por el Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR (PIG). Esta guía permite establecer los aspectos más relevantes a considerar cuando se realiza la inspección visual del sitio y, aunque el formulario no está destinado para realizar evaluaciones del riesgo, ya que esto requiere de la incorporación de conceptos más complejos, es una manera que permite incluir algunos de los aspectos básicos preliminares que se requieren para llevar a cabo una evaluación de riesgo del talud. Así, por criterio experto del PIG, se establecieron dos áreas generales de evaluación, a saber:

1. La caracterización del talud: En ésta se incluyen las características talud, tales como altura, pendiente, material que lo conforma entre otros, así como condiciones climáticas de la zona.
2. Observaciones en la zona del talud: En ésta, 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, cuya interacción también se determinó con criterio experto del PIG, se obtiene una calificación de la evaluación de la condición del talud, la cual no pretende cuantificar la condición de riesgo o vulnerabilidad del talud, sino más bien, identificar la necesidad o no de recomendaciones técnicas o intervenciones directas a cargo de profesionales especializados en geotecnia, a partir de la evaluación visual del talud la cual puede ser ejecutada por personas con conocimientos básicos de ingeniería geotécnica.

A continuación, en la Tabla 11 se muestra un resumen de la aplicación del formulario de inventario de taludes aplicado a los taludes encontrados en el estacionamiento 38+500 y el estacionamiento 40+750. En ambos taludes, el talud de corte al lado derecho (sentido San José – Caldera) corresponde a una zona en la cual se ha presentado problemas de hidrotermalismo y DAR que han afectado las obras de contención realizadas con concreto lanzado, lo que ha requerido hacer modificaciones en la geometría del talud, con la reconformación de bermas. En el caso del talud de estacionamiento 38+500, adicionalmente fue necesario realizar la colocación de pedraplenes. Es importante destacar, que según el informe INF-PI-UGERVN-14-2014, ambos taludes presentaron problemas de deslizamiento en noviembre del 2014.

Informe EIC-Lanamme-INF-0954-2023	agosto, 2023	Página 43 de 47
-----------------------------------	--------------	-----------------



Tabla 11. Inventario para la evaluación de la condición de taludes aplicado a los taludes encontrados en el estacionamiento 38+500 y el estacionamiento 40+750

Caracterización									
Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud (m)	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Naturaleza del material	Vegetación	Uso del suelo
9.935841 / -84.424648	2000-3000	60	Escarpado	15	Compuesto (primordialmente suelo)	Sin grietas	Friccionante	Ninguna	Camino/ carretera
<b>Condición del talud</b>									
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	Si	Rectilínea	Seco	No	No	No	No	0-50 - Extremadamente pequeño	No
<b>Evidencia de movimiento</b>									
<b>Estructuras cercanas</b>									
Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal	
No hay	No	0 m -3 m	Autopista	No	No	No	No	No	
<b>Redes y Puentes</b>									
<b>Caracterización</b>									
Latitud/ Longitud	Precipitación	Pendiente (°)		Altura del talud (m)	Tipo de material	Condición de la cara del talud	Naturaleza del material	Vegetación	Uso del suelo
9.936029 / -84.406238	2000-3000	50	Escarpado	15	Compuesto (primordialmente suelo)	Altamente agrietado	Ambos	Ninguna	Camino/ carretera
<b>Condición del talud</b>									
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	Compuesta	Seco	No	Si	Si	No	50-5000 - Mediano	No
<b>Evidencia de movimiento</b>									
<b>Estructuras cercanas</b>									
Obras de retención	Viviendas o comercios	Vías	Tipo de vía	Cultivos	Eléctrica	Agua potable	Vehicular	Peatonal	
Si (mal estado)	No	3 m -8 m	Autopista	No	No	No	No	No	
<b>Redes y Puentes</b>									



Estacionamiento 40+750



Estacionamiento 38+500



Como resultado de la aplicación de la herramienta, teniendo en consideración las medidas tomadas por la concesionaria y la condición actual de los taludes, la aplicación de la “Guía para el uso de la herramienta para evaluación de condición de taludes” no arrojó la necesidad de realizar análisis geotécnicos más detallados. Sin embargo, se mantendrá un monitoreo sobre ellos con el fin de realizar análisis específicos en el caso que fuera necesario evaluar cambios en la condición de estos taludes.

## VII. Comentarios finales

Teniendo en consideración los resultados mostrados en las secciones anteriores, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, deben ser asignados al profesional en geotecnia responsable que la Administración destine para realizar el análisis completo y emitir las propuestas e implementación de obras de estabilidad de taludes, en caso de ser necesarias. Sin embargo, constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que puede sufrir la estructura del pavimento y cualquier otra obra cercana.

Se sugiere llevar a cabo estudios adicionales incluyendo ensayos de laboratorio y en sitio, es decir una exploración geotécnica más a detalle. La omisión de estos análisis podría significar riesgos económicos y a los usuarios. Es por ello, que se considera recomendable realizar la exploración geotécnica detallada para establecer un modelo geotécnico más detallado 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 representativas de saturación de los materiales de las capas inferiores, en vista a la influencia observada de la saturación de los materiales y el comportamiento de los taludes analizados, así como también evaluar diferentes propuestas de estabilización de los taludes y su respectiva optimización.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones de la condición actual se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados y las condiciones evaluadas, los resultados de los factores de seguridad en la modelación tridimensional, en términos generales, para ambos sectores analizados fueron favorables únicamente en una condición seca y en análisis estático, cumpliendo con las recomendaciones dadas por el CGTLCR.

No obstante, las simulaciones realizadas, para las condiciones pseudo-estáticas o con la presencia de niveles freáticos y saturación presentaron valores inferiores a las recomendaciones dadas para los factores de seguridad recomendados por el CGTLCR. Por esta razón, se sugiere ampliar la información disponible y llevar a cabo un estudio de la estratigrafía del suelo, acompañada de una mayor cantidad de ensayos de laboratorio a cargo del profesional en geotecnia especializado que se designe para tal efecto, con la finalidad de hacer una evaluación más detallada y verificar la pertinencia de propuestas de estabilización y control de aguas superficiales y subterráneas para mejorar las condiciones de estabilidad de los taludes.

Adicionalmente, fueron observadas variaciones en los valores de los factores de seguridad obtenidos por los análisis bidimensionales y los respectivos valores con los análisis tridimensionales. En general, los factores de seguridad obtenidos en los análisis tridimensionales presentaron valores de factores de seguridad más altos, lo cual puede estar asociado al hecho de que la topografía del terreno, en algunos casos puede favorecer la obtención de factores de seguridad más altos. Sin embargo, diferentes estudios indican que algunas ocasiones es posible que se presenten comportamientos opuestos, donde los resultados de los análisis bidimensionales son mayores que los obtenidos en análisis tridimensionales. Debido a lo anterior, es necesario resaltar la importancia de la experiencia y criterio técnico del ingeniero geotecnista para establecer el valor más adecuado. Sin embargo, es importante destacar que una de las ventajas de aplicar el análisis tridimensional está en que se facilita la identificación de aquellas regiones que podrían presentar factores de seguridad más bajos y que difícilmente podrían ser identificadas por el ingeniero en campo.



También se considera importante realizar 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 obrar de infraestructura cercana.

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

### VIII. Referencias

1. Marinos, P.; Hoek, E. (2000). **GSI: A geologically friendly tool for rock-mass strength estimation**. Proc. Geo. Eng. 2000 at the Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne. Technomic Publishers, Lancaster, Pennsylvania, pp. 1422–1446.
2. Programa de Ingeniería Geotécnica (2022). **EIC-Lanamme-INF-0740-2022 Clasificación, caracterización y análisis cinemático de la sección conformada por un talud ubicado en el kilómetro 46+200, Ruta Nacional No.27, San José - Caldera**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
3. Ruiz, P.; Arauz, A.; García, J.; Villalobos, G.; Sedó, A.; Suárez, C. (2015). **Drenaje ácido de rocas en taludes de la ruta nacional 27, San José – Caldera, Costa Rica**. Revista Geológica de América Central, 53: 25-46. San José, Costa Rica. DOI: 0.15517/rgac.v53i0.21146
4. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2010). **LM-PI-PV-ERV-27-10 Evaluación de las condiciones de ladera est. 39+000 a est. 53+0000, tramo II carretera San José – Caldera Ruta Nacional 27**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
5. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2011). **LM-PI-UE-002-11 Evaluación de los tramos ubicados entre los est. 36+340 a 36+460, 38+700 a 38+800 y 44+300 a 44+530 Tramo II, Ruta Nacional 27 San José – Caldera**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
6. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2013). **LM-PI-UGERVN-007-2013 Informe de fiscalización carretera San José – Caldera, ruta nacional no. 27. Revisión Integral de Taludes**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
7. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2015). **LM-PI-UGERVN-3-2015 Estudio de presencia de drenaje ácido de rocas (DAR) en taludes de la ruta nacional 27**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
8. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2016). **LM-PI-UGERVN-005-2016 Informe de evaluación del proyecto San José – Caldera. Ruta Nacional 27. Año 2015-2016**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
9. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2017). **INF-PI-UGERVN-04-2017 Informe de evaluación del proyecto San José – Caldera. Ruta Nacional 27. Año 2016-2017**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
10. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2018). **INF-PI-UGERVN-12-2018 Informe de evaluación del proyecto San José – Caldera. Ruta Nacional 27. Año 2017-2018**. LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



11. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2019). **INF-PI-UGERVN-01-2019 Informe de evaluación del proyecto San José – Caldera. Ruta Nacional 27. Año 2018-2019.** LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
12. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2020). **INF-PI-UGERVN-12-2020 Informe de Evaluación del Proyecto San José – Caldera Ruta Nacional 27, Años 2019 – 2020.** LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
13. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2021). **EIC-Lanamme-INF-0140-2021 Informe de evaluación del proyecto San José – Caldera. Ruta Nacional 27. Año 2020-2021.** LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
14. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (2022). **EIC-Lanamme-INF-0776-2022 Informe de evaluación del proyecto San José – Caldera. Ruta Nacional 27. Año 2021-2022.** LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
15. Unidad de Puentes (2013). **LM-PI-UP-PC05-2013. Inspección del puente sobre la quebrada Salitral ruta nacional 27.** LanammeUCR. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
16. 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>