

Elaboración del mapa de riesgo geotécnico a movimientos en masa en taludes de suelo en el Sector Mucuchíes – El Vergel, Municipio Rangel del Estado Mérida

Elaboration of the geotechnical risk map for mass movements on soil slopes in the Mucuchíes - El Vergel Sector, Rangel Municipality of Mérida State

González, Balmari^{1*}; Iglesias, Marya¹; Rivas, Daniel²

¹Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica,

²Departamento de Geomecánica, Universidad de Los Andes,
Mérida, Mérida, Venezuela.

*balmarig@gmail.com

Resumen

La zona de estudio se ubica en el municipio Rangel del estado Mérida, en donde se evalúan diez taludes de suelo que bordean la Troncal 007 entre Mucuchíes y El Vergel. El estudio tiene como objeto elaborar el mapa de riesgo geotécnico a la ocurrencia de movimientos en masa en taludes de suelo, determinando la estabilidad en base a la geometría de los taludes y propiedades geomecánicas de sus materiales. Estás propiedades se obtienen a través de ensayos de laboratorio realizados a muestras de suelo. Se obtiene el peso unitario (con valores entre 17,68 kN/m³ y 22,68 kN/m³), la cohesión (variando entre 11,99 kN/m² y 39,89 kN/m²), y el ángulo de fricción interna (entre 10° y 42°). Se determinó que estos suelos se componen granulométricamente de arenas con contenido de arcillas, y corresponden con suelos secos, ligeramente plásticos, cohesivos-friccionantes. Los factores de seguridad correspondientes se obtuvieron a partir de simular estas propiedades en el software Slide, siendo en condición estática seca el más estable el TMV-05 con un FS de 2,097 y el más inestable el TMV-09 con 0,393. El grado de riesgo presente en el área se evalúa a través de la metodología propuesta por Suarez (2012), que consiste en analizar los parámetros indicativos de amenaza y vulnerabilidad; estos datos se exportan a un SIG para interpolar la información y elaborar los mapas de cada caso, que se solapan para generar el mapa de riesgo geotécnico. De los resultados obtenidos, la zona presenta un riesgo “bajo” en el 44% del área, distribuido en su mayoría sobre el poblado de Mucuchíes, un 38% de riesgo “moderado” localizado en la Troncal 007 a las afueras de Mucuchíes, y solo un 3% de riesgo “alto”, ubicado en las adyacencias del talud TMV-09.

Palabras claves: Movimientos en masa, factor de seguridad, amenaza, vulnerabilidad, riesgo

Abstract

The study area is in the Rangel municipality of Mérida state, where ten soil slopes bordering Troncal 007 between Mucuchíes and El Vergel are evaluated. The study aims to generate the geotechnical risk map for the occurrence of mass movements in soil slopes, determining the stability based on the slopes' geometry and their materials' geomechanical properties. These properties are obtained through laboratory tests carried out on soil samples. The unit weight (with values between 17.68 kN/m³ and 22.68 kN/m³), the cohesion (varying between 11.99 kN/m² and 39.89 kN/m²), and the angle of internal friction (between 10° and 42°) are calculated. It was determined that these soils are granulometrically composed of sand with clay content and correspond to dry, slightly plastic, cohesive-frictional soils. The corresponding safety factors are obtained from simulating these properties in the Slide software, being in the dry, static condition, the most stable TMV-05 with an SF of 2.097 and the most unstable TMV-09 with 0.393. The degree of risk present in the area was evaluated through the methodology proposed by Suarez (2012), which consists of analyzing the indicative parameters of hazard and vulnerability; These data are exported to a GIS to interpolate the information and prepare the maps for each case, which are overlapped to generate the geotechnical risk map. From the results obtained, the area presents a "low" risk in 44% of the area, distributed mainly over the town of Mucuchíes, 38% of "moderate" risk located on the 007 trunk road on the outskirts of Mucuchíes, and only 3% of "high" risk, located in the vicinity of the TMV-09 slope.

Keywords: Landslide, security factor, hazard, vulnerability, risk

1 Introducción

La superficie de la tierra nunca es perfectamente plana, sino que está conformada por diferentes tipos de laderas (Tarbuck y Lutgens, 1999). Estas laderas son afectadas por procesos geodinámicos de distinta índole, que pueden provocar deslizamientos, los cuales producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, daños en las obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, entre otros (Suarez, 2012).

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia, tales como el relieve, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas (Suarez, 2012), tal es el caso del área de estudio, que por estar ubicada en Los Andes venezolanos, específicamente en una de las zonas parameras del estado Mérida, se caracteriza por ser una zona montañosa de pendientes abruptas, desarrollada en forma de ramales alineados correspondientes a prolongaciones de la Sierra de la Culata y de la Sierra Nevada, con el característico clima de páramo, donde las temperaturas oscilan entre un máximo de 16,8° C y un mínimo de 6° C (Corpoandes, 2007). También cabe destacar la influencia tectónica de la Falla de Boconó, cuya traza se curva 30° en el sentido de las agujas del reloj al oeste de la población de Mucuchíes, originando esfuerzos transtensivos que generan una cuenca en tracción (Alvarado, Cantos, Pérez, y Audemard, 2015).

Suarez (2012) indica que el volumen total de daños causados por estos procesos de deslizamientos es superior al de los terremotos y las inundaciones. Sin embargo, un gran porcentaje de las pérdidas son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se implementan medidas de prevención o control. Con este objetivo se plantea el presente trabajo, mediante el cual se genera un mapa de riesgo geotécnico para el área urbana de Mucuchíes y sus alrededores, prestando especial atención a los taludes que bordean en esta zona la Troncal 007 o carretera Trasandina, vía de comunicación vital entre los estados Mérida, Barinas y Trujillo, a través del estudio de las propiedades geomecánicas de los materiales que forman dichos taludes, y la simulación de su comportamiento con la ayuda de software especializados como Slide

2 Descripción del área de estudio

El sector Mucuchíes - El Vergel, se encuentra ubicado en el occidente de Venezuela, hacia el Noreste del estado Mérida dentro del municipio Rangel (Fig. 1). Su principal y única vía de acceso es la Troncal 007 o carretera Trasandina.

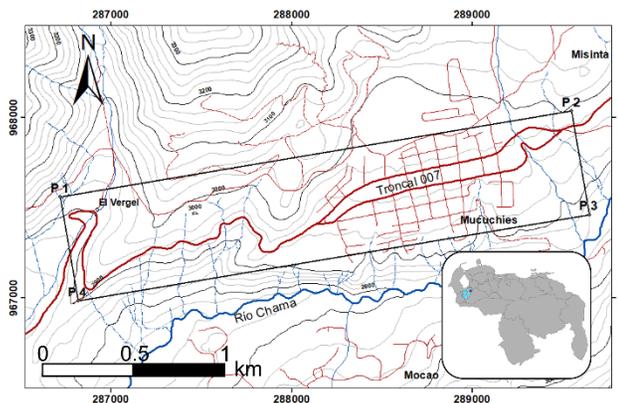


Fig. 1. Mapa topográfico con la ubicación del área de estudio.

Ticart (1966), describe a Mucuchíes como el sector del valle superior del río Chama, ubicando toda la zona debajo de unos 3000 m de altitud; dominado al noreste por la Sierra de la Culata, que alcanza poco más de 4300 m de altitud y al suroeste por la Sierra Nevada de Mérida.

Se caracteriza por ser una zona montañosa de pendientes abruptas con la presencia de terrazas, conos de deyección, colinas redondeadas y fondos de valles donde se desarrolla la mayor parte de la actividad económica y social de la zona.

Generalmente se presentan dos períodos climáticos, uno seco y frío de diciembre a marzo y otro lluvioso de abril a octubre. La temperatura oscila entre un máximo de 16,8° C y un mínimo de 6° C. Tipo de clima de Páramo (Corpoandes, 2007).

La hidrografía de la zona de estudio se encuentra principalmente dominada por la parte alta de la cuenca del río Chama y algunas quebradas como la quebrada El Molino, quebrada Curva del pan, quebrada La Parra y quebrada MisInta.

La litología presente en el área de estudio, tal como es plasmada en el “Mapa geológico de la Sierra Nevada, al sur de Mucuchíes” (Grauch, 1975), comprende principalmente un basamento de rocas metamórficas (gneiss y esquistos) correspondientes a la Asociación Sierra Nevada (Peis), sobre el que se han depositado terrazas (Qpt) y aluviones cuaternarios (Qal).

Estructuralmente, el área es controlada por la Falla de Boconó, la cual es el principal accidente geológico del occidente Venezuela. Se manifiesta con movimientos rumbo deslizantes dextrales con componente normal. En la zona entre las poblaciones de Tabay y La Toma, estado Mérida, se ha identificado que la falla se dispone de forma paralela y en algunos casos controla, al valle del río Chama (Alvarado y col., 2015).

En la Fig. 2 se muestra el mapa geológico de la zona como resultado de la integración del mapa geológico de Grauch (1975) y la interpretación visual de imágenes satelitales. La traza de la falla se asumió a través de evidencias de falla observadas en las imágenes y su correspondencia con la descripción de Alvarado y col. (2015).

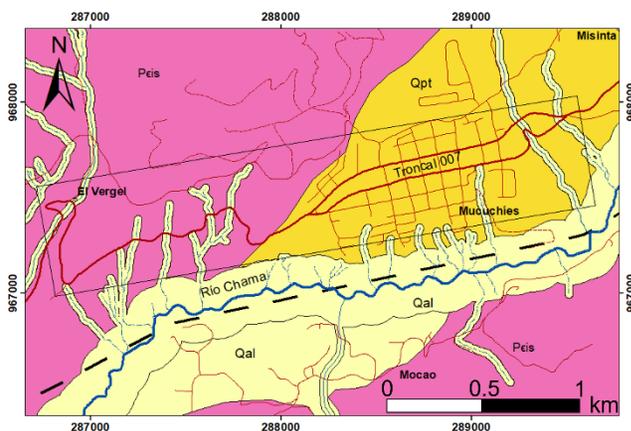


Fig. 2. Mapa geológico del área de estudio.

3 Marco Teórico

3.1 Suelos

Es la cobertura superficial de la corteza terrestre producto de la alteración (mecánica, química y biológica) de los minerales de las rocas preexistente. Los mismos pueden ser residuales (se encuentran en el sitio donde se formaron) o transportados.

3.2 Talud o ladera

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente (Suarez, 2012).

3.3 Movimiento en masa

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Suarez, 2012).

3.3 Factores condicionantes y desencadenantes

Son factores capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Los factores condicionantes (pasivos), son factores internos: naturaleza, estructura y forma del terreno, los factores desencadenantes (activos) se consideran factores externos que provocan o desencadenan los movimientos en masa (precipitaciones, sismos, erosión) estos determinan el grado y la magnitud del movimiento. (González de Vallejo, y col., 2002).

3.4 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Consisten en análisis que se basan en las propiedades geomecánicas de los materiales y la geometría de los taludes

para definir posibles superficies de rotura y grado de estabilidad. Existen dos métodos: equilibrio límite y numéricos

3.5 Método de equilibrio límite.

Este método supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla. El análisis se puede realizar directamente estudiando la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. (Suarez, 2012).

3.6 Factor de seguridad (FS).

Empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña (Suarez, 2012). Para establecer una condición asociada a la estabilidad a partir del factor de seguridad se emplea la Tabla 1.

Tabla 1. Valores del factor de seguridad asociados a la estabilidad de laderas. Tomado de Rivas, Belandria, Bongiorno y Moreno (2015) citado en (Rivas, 2016)

ESTABILIDAD	FACTOR DE SEGURIDAD	CONDICIÓN CINEMATICA.
Muy Estable.	>2,5	Configuración cinemática inactiva.
Estable.	1,5 < F.S. < 2,5	Cinemática aparentemente inactiva.
Ligeramente Estable.	1,2 < F.S. < 1,5	Poca o nula densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales.
Inestable	1 < F.S. < 1,2	Media densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales.
Muy Inestable	F.S. < 1	Alta densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales.

3.7 Amenaza

Amenaza natural es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructor, en un área específica dentro de un determinado período de tiempo (Varnes, 1984, citado en Suarez, 2012).

Rivas, Belandria, Bongiorno y Moreno (2015) (Citado en Rivas, 2016) proponen una escala de clasificación de los diferentes factores de seguridad donde se tiene que si el FS arroja un resultado mayor a 2,5 indica que el talud es muy estable, entre 1,5 -2,5 taludes estables, entre 1,2 -2,5 ligeramente estables, de 1 a 1,2 inestable y finalmente los FS menores a 1 serán muy inestables.

3.8 Vulnerabilidad

Grado de daños o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada. (González de Vallejo, y col., 2002). Suarez (2012) plantea tres tablas para la evaluación multicriterio de la vulnerabilidad, las cuales toman en cuenta la vulnerabilidad social, vulnerabilidad económica y vulnerabilidad física y en obras civiles. Los

resultados se estiman en grado de vulnerabilidad con un índice promedio de 0 hasta 1, en donde la vulnerabilidad muy baja con un índice 0, vulnerabilidad baja de 0,25, vulnerabilidad media de 0,5, vulnerabilidad alta de 0,75, y vulnerabilidad muy alta de 1.

3.9 Riesgo

El riesgo es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, la salud, la propiedad o el ambiente. Se mide en vidas humanas, propiedades en riesgo y daños ambientales. El riesgo generalmente es estimado como el producto de la probabilidad de la amenaza por las consecuencias para los elementos en riesgo. (Suarez, 2012). Se calcula usando la Ecuación 1. La estimación del grado de riesgo se realiza a partir de la tabla.

$$\text{RIESGO} = \text{AMENAZA} \times \text{VULNERABILIDAD}$$

Ecuación 1. Cálculo del riesgo.

4 Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación, se diseña el esquema metodológico mostrado en la Fig. 3, en el que se mencionan las etapas del trabajo y cada una de sus actividades. Se trabaja en tres etapas, Pre-Campo, Campo y Post Campo, las cuales se describen a continuación:

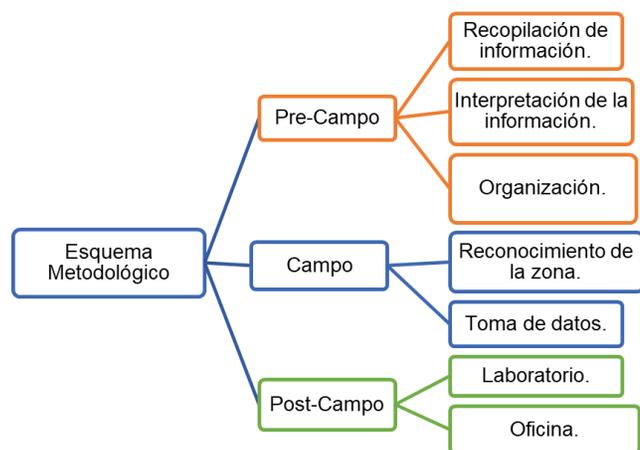


Fig. 3. Esquema metodológico del estudio.

4.1 Etapa de Pre – Campo.

Esta primera etapa consiste en la revisión y recopilación de la información disponible sobre el área de estudio y las metodologías a implementar, con el fin de reconocer la zona de manera general, sus vías de acceso y las precauciones a tomar, y así finalmente organizar la etapa de campo para

trabajar de manera más eficiente.

4.2 Etapa de Campo.

Se trata del conjunto de actividades que se realizan directamente en el área de estudio, de vital importancia para cumplir con los objetivos del proyecto, asegurando información de primera mano. se realiza reconocimiento del área de estudio, continuando con ubicación de los taludes de suelo a estudiar, seguido por la toma de datos: mediciones “*in situ*” de rasgos geométricos, geológicos y geotécnicos y toma de muestras de suelo para el estudio de las mismas en la etapa de post campo. Así como también la toma de datos para la evaluación de la vulnerabilidad, que son obtenidos mediante observaciones y entrevistas realizadas en esta etapa. Se valora la vulnerabilidad social, física en obras o vialidad y económica de exposición al elemento amenaza en cada talud.

4.3 Etapa de post campo.

Es la etapa final del proyecto, donde se procesa y analiza toda la información y los datos obtenidos de las etapas anteriores, cuyos resultados permiten cumplir con los objetivos previstos.

Durante esta etapa se realizan los ensayos de laboratorio donde se determinan las propiedades geomecánicas de las muestras de suelo entre los cuales se tienen: contenido de humedad ($w\%$), peso específico relativo (G_s) granulometría por tamizado para conocer el tipo de suelo presente ($G\%$; $S\%$; $F\%$; C_u y C_c), peso unitario (γ_m), límites e índices de consistencia ($LL\%$, $LP\%$, $IP\%$), y compresión simple (q_u ; α ; ϕ ; C y E).

Seguidamente de los resultados del laboratorio en conjunto con las medidas tomadas en campo de la geometría de los taludes, se procede a realizar la simulación de los mismos en el software Slide el cual hace uso del método de equilibrio límite y determina los FS por los métodos de Bishop simplificado, GLE, Fellenius y Janbu simplificado para la obtención de las posibles superficies de rotura y factores de seguridad en los diferentes estados: estáticos – dinámicos, seco, subsaturado y saturado. Una vez obtenidos estos valores se realiza un promedio en cada estado para la realización de gráficas y evaluación de la amenaza según los factores de seguridad.

A partir de las tablas de estimación de amenaza y vulnerabilidad propuestas por Suarez (2012) se obtienen valores que se interpolan en un SIG para la generación de los mapas temáticos de amenaza y vulnerabilidad los cuales se solapan utilizando la ecuación de riesgo (Ecuación 1) para la realización del mapa de riesgo geotécnico a movimientos en masa del área de estudio.

5 Resultados

5.1 Descripción de los taludes y sus propiedades geomecánicas

Dentro del área de estudio se reconocieron 12 taludes al borde de la Troncal 007. Dos de estos taludes están compuestos de roca por lo que no forman parte de los alcances del proyecto. Se nombraron los taludes utilizando el código TMV seguido de números del 01 al 10, según su orden de aparición en sentido Mucuchíes – El Vergel. La ubicación de cada uno se muestra en la Fig. 4.

Estos taludes resultaron ser de geometrías variadas, con alturas que van desde los 3,8 metros (para el talud TMV-05) hasta los casi 13 metros (para el talud TMV-01). Las paredes presentan una inclinación promedio de 67,7°, variando entre los 45° (TMV-07 y TMV-10) hasta los 82° en el talud TMV-08.

En su mayoría, los taludes se encontraban en estado seco al momento del estudio. Del TMV-01 al TMV-05 presentan granulometría variada, típica de depósitos aluviales. Desde el talud TMV-06 en adelante, la composición de los taludes es de material homogéneo con granos angulares, evidenciando el rasgo residual del suelo, el cual es formado *in situ* por la meteorización de la roca preexistente.

Varios taludes se muestran intervenidos por actividades antrópicas, como sembradíos y terraceo por ganado. La vegetación presente varía de escasa presencia de herbáceos y cultivos, a boscosa y más densa en ciertos casos. Algunos de los taludes evidenciaban actividad de deslizamientos recientes y también se observaron procesos erosivos tipo cárcavas.

Dos de los taludes son atravesados por drenajes que afectan su estabilidad. Los mayores problemas se observan en los alrededores del talud TMV-09, evidenciado por una falla pasada en la carretera, donde parte de la misma sufrió desprendimiento debido a una rotura aparentemente circular del suelo subyacente. Este deslizamiento causó que fuese necesario recortar nuevamente la pared del talud para mover la carretera.

Con respecto a los elementos expuestos a un posible deslizamiento, se identificaron principalmente la carretera junto con los transeúntes y vehículos que constantemente transitan por la zona. También se identificaron sembradíos y algunas casas que podrían verse afectadas por la ocurrencia de un movimiento en masa dentro del área de estudio.

Para determinar las propiedades geomecánicas específicas de los suelos presentes se tomaron seis muestras directamente de los taludes, excluyendo aquellos que presentaban litología similar a otro en que ya se hubiese tomado la muestra. Estas muestras se codificaron como MS-01 a MS-06. A cada una de las muestras se le aplicaron los ensayos mencionados en la metodología, y los resultados obtenidos se resumen en Tabla 2.

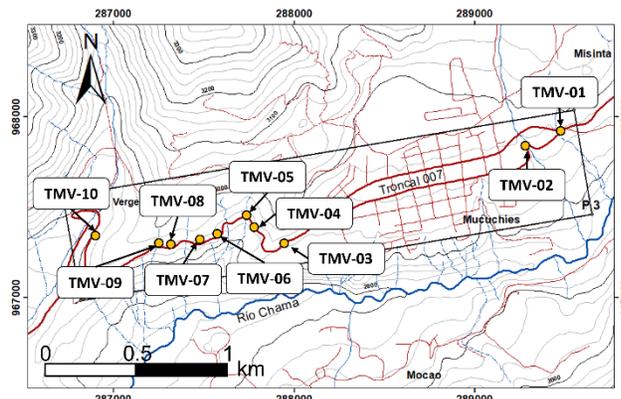


Fig. 4. Ubicación de los taludes estudiados.

Tabla 2. Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio

Propiedad	MS-01	MS-02	MS-03	MS-04	MS-05	MS-06
w (%)	3,93	1,41	7,53	9,28	4,57	2,49
Gs	2,71	2,60	2,46	2,69	2,27	2,73
γ_m (kN/m ³)	22,68	21,15	20,00	20,17	22,66	17,68
%G	44,76	35,90	32,36	14,95	21,36	14,61
%S	48,55	55,44	57,95	75,58	68,85	76,90
%F	6,69	8,67	9,69	9,48	9,78	8,49
Cu	52,20	39,73	38,63	9,26	10,65	12,95
Cc	0,85	0,52	0,49	0,72	0,87	0,85
LL (%)	29,06	20,17	24,56	24,47	18,43	29,06
LP (%)	20,21	15,67	19,05	18,29	14,55	20,21
IP (%)	8,84	4,50	5,51	6,18	3,88	8,84
q_u (kg/cm ²)	0,87	0,87	1,15	1,25	0,49	0,77
α (°)	55	60	78	57	50	66
ϕ (°)	20	30	66	24	10	42
C (kg/cm ²)	0,31	0,25	0,12	0,41	0,20	0,17
E(kg/cm ²)	0,28	0,35	0,29	0,38	0,21	0,24

En general se destaca que las muestras representan suelos secos, en los que el contenido de humedad no supera el 10%. Contienen arenas en mayor porcentaje, son ligeramente plásticos y tienen un comportamiento cohesivo – friccional.

A partir de los porcentajes granulométricos y los límites de consistencia, se realizó la clasificación de cada suelo. Según la clasificación de S.U.C.S, la mayoría de las muestras se corresponde con suelos tipo SP-SC (arenas mal gradadas), a excepción de la muestra MS-06 que es SW-SC (Arena bien gradada). De igual manera, aplicando la clasificación de AASHTO, MS-01 se clasifica como A-1-a (0), mientras que el resto de muestras corresponden con A-1-b(0). AASHTO describe estos tipos de suelo como “Fragmentos de Piedra Grava y Arena” y los califica como material de fundación “excelente a bueno”.

5.2 Cálculo de los factores de seguridad

De la simulación en el software slide se obtuvieron como resultados factores de seguridad en estados estático-seco y dinámico-subsaturado los cuales se evaluaron en la tabla de estabilidad según factores de seguridad propuesta por Rivas, Blandria, Bongiorno y Moreno (2015) (citada en

Rivas, 2016) (Tabla 1), donde se determina la estabilidad de cada talud dependiendo del FS.

En el gráfico de la Fig. 5 se muestran los resultados en condiciones estáticas secas. Se observa que para los taludes TMV-02,04,05,07 y 08, dichos valores se encuentran entre el rango de 1,2 – 1,5, indicando taludes ligeramente estables. Los taludes TMV-03,06 y 10 presentan valores entre 1,5 – 2,5, mostrando taludes estables. Finalmente, los taludes TMV-01 y TMV-09, resultan en valores menores a 1, siendo taludes inestables, coincidiendo con los vestigios observados en campo de antiguos movimientos en masa de gran magnitud para el talud TMV-09.

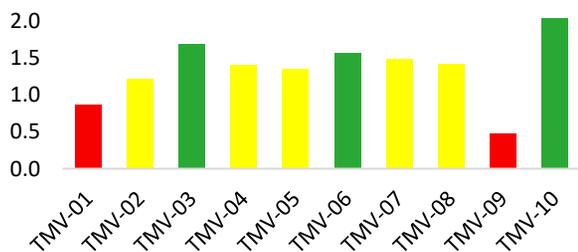


Fig. 5. Estabilidad de taludes a partir del FS en estado seco sin sismo.

En condiciones dinámicas subsaturadas, se observa en la Fig. 6 que todos los factores de seguridad arrojan valores menores a 1 indicando que estas condiciones son las más desfavorables resultando en que todos los taludes son inestables.

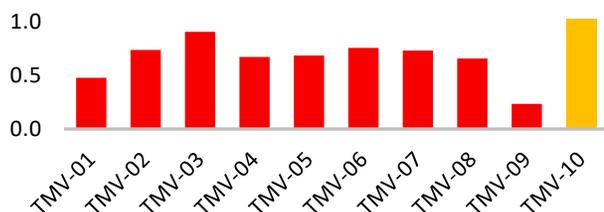


Fig. 6. Estabilidad de taludes a partir del FS en estado subsaturado con sismo.

5.3 Evaluación de la amenaza

La estimación del grado de amenaza se realizó a partir la tabla Factores topográficos, ambientales y geotécnicos de Suarez (2012). Los parámetros evaluados en dichas tablas son datos obtenidos en mediciones en campo. Es importante destacar que la investigación se basa en el estudio de taludes de suelo, por lo que observando que las tablas expuestas por Suarez (2012) toman en cuenta parámetros característicos que se evalúan en rocas, se hace necesario realizar la revaloración en el peso de cada parámetro. Esta se realiza dividiendo el porcentaje total de los parámetros característicos de rocas en partes iguales, que luego se distribuye en los demás parámetros.

Se obtuvo que los taludes TMV-01,05 y 09 presentan una amenaza muy alta con valores mayores a 10, debido a las condiciones observadas en los mismos. Tal es el caso en el talud TMV-09 donde se observó evidencia de un antiguo deslizamiento de gran magnitud. Los taludes TMV-02,04,07 y 08 presentan una amenaza alta indicada por el rango de valores (entre 8,5 – 10) que se obtuvo como resultado y los taludes TMV-03,06 y 10 presentan una amenaza moderada con valores entre 7,5 y 8 (Fig. 7).

Realizando una comparación con los resultados del grado de estabilidad de los taludes obtenido por los FS y la estimación del grado de amenaza se puede observar que aquellos que son inestables también arrojan como resultado un mayor grado de amenaza (TMV-01 y TMV-09). Indicando una concordancia en los resultados.

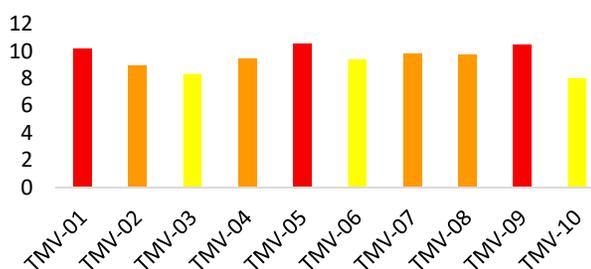


Fig. 7. Evaluación de la amenaza en cada talud.

5.4 Evaluación de la Vulnerabilidad

La evaluación de la vulnerabilidad se realiza para cada talud a partir de las tablas de vulnerabilidad social o humana, económica y física en obras y vialidad, tomadas de Suarez (2012). Estos resultados fueron clasificados con una vulnerabilidad alta para el talud TMV-09, vulnerabilidad moderada los taludes TMV-03 y 07, y vulnerabilidad baja para los taludes TMV-01,02,04,05,06,08 y 10 como se observa en la Fig. 8.

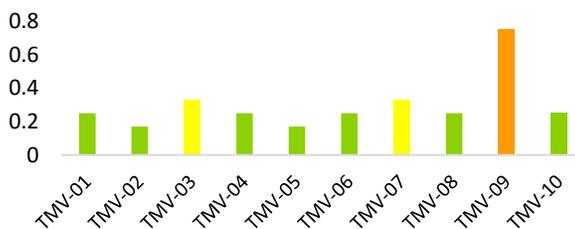


Fig. 8. Evaluación de la vulnerabilidad en cada talud

5.5 Mapa de amenaza

A partir de los valores mostrados en Fig. 7 se generó el mapa de amenaza, interpolando y extrapolando los datos en un SIG, en la Fig. 9 se observa el resultado, donde la amenaza varía de “muy baja” a “muy alta” en las adyacencias de la

Troncal 007.

Para el talud TMV-01 la amenaza es “muy alta” debido a los factores actuantes, tal como la actividad agrícola que se desarrolla sobre el tope del talud, incluyendo el riego que erosiona el suelo aumentando su inestabilidad. En el TMV-02 el grado de amenaza disminuye un poco, clasificándose como una amenaza “alta”; la más baja se tiene en el poblado de Mucuchíes, debido a que presenta pendientes leves, infiriendo que hay pocas posibilidades de que ocurra un deslizamiento que afecte negativamente la carretera Trasandina.

Seguidamente, en el talud TMV-03 el grado de amenaza aumenta, llegando a un grado “moderado”. En el talud TMV-04 se refleja una subida en el grado de amenaza, alcanzando el nivel “alto”, el cual continúa en ascenso en el talud TMV-05, en el que se presenta una amenaza “muy alta” debido a la influencia de una quebrada que afecta la estabilidad de este. Los taludes TMV-06, TMV-07 y TMV-08 cuentan con una amenaza “alta”, presentando características semejantes entre ellos, ya que se constituyen por el mismo tipo de suelo. Un caso particular es el talud TMV-09 donde aumenta el grado de amenaza, esto es debido a su FS y las evidencias de un deslizamiento que perjudicó gran parte de la carretera. Finalmente, el talud TMV-10 presenta un grado de amenaza “moderada”, disminuyendo debido a las características del mismo, el cual no es influenciado por ningún cuerpo de agua, la vegetación en la zona es arbórea generando mayor estabilidad y la inclinación es moderada.

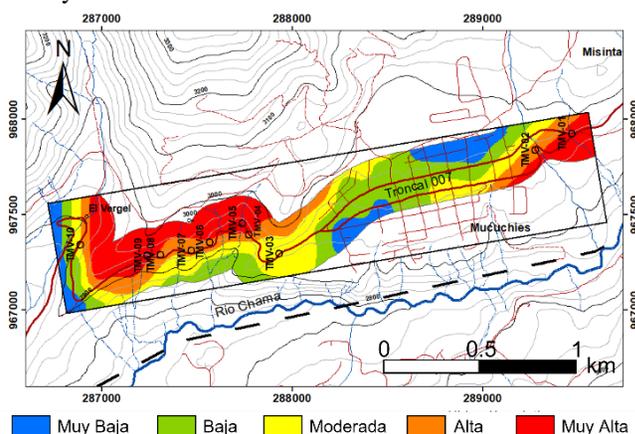


Fig. 9. Mapa de amenaza

5.6 Mapa de vulnerabilidad

De manera análoga, los valores de vulnerabilidad total (Fig. 8) se integraron en el SIG, generando así el mapa de vulnerabilidad mostrado en la Fig. 10, en donde se muestra que la misma varía de “baja” a “moderada” en las adyacencias de la Troncal 007, elevándose a “alta” en las cercanías del talud TMV-09 por sus antecedentes, como lo es un deslizamiento donde la vialidad se vio afectada severamente, debido a que gran parte de la carretera se deslizó. En ese momento, para reactivar la vialidad en esta zona, fue necesario excavar el talud, ampliando la carretera, lo cual tuvo una duración de al menos 3 meses según datos suministrados por

trabajadores de la alcaldía del municipio Rangel.

Cabe destacar que el pueblo de Mucuchíes se ve caracterizado con “vulnerabilidad baja”, a pesar de ser un centro poblado en el que más personas y obras se verían afectadas. Esto se debe a que este estudio está basado en la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa en las cercanías de la carretera Trasandina; y como dentro del pueblo no hay pendientes abruptas o taludes que puedan causar este tipo de eventos, se califica de esta forma.

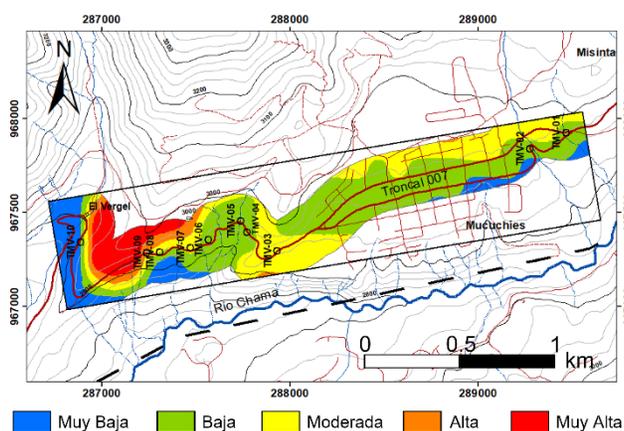


Fig. 10. Mapa de vulnerabilidad

5.7 Mapa de Riesgo

Al solapar los mapas de Amenaza y Vulnerabilidad en el SIG, usando la Ecuación 1, se genera el Mapa de Riesgo Geotécnico mostrado en la Fig. 11, donde se observa la variación del grado de riesgo a lo largo de la carretera trasandina, en un rango de 150 metros a cada lado de esta entre el poblado de Mucuchíes y el sector El Vergel. Resalta que para la mayoría de los taludes el riesgo es de grado “moderado”, abarcando el 39% del área considerada, y solo para los taludes TMV-08 y TMV-09 el mismo aumenta al grado “alto”, ocupando apenas el 3% del territorio, debido a que por esta zona la vulnerabilidad es mucho mayor al resto del área, y se conjuga con la amenaza alta de estos taludes, generando mayores probabilidades de causar daños importantes a sus alrededores. Es por esto que la zona debe ser la prioridad a la hora de aplicar medidas correctivas. El grado de riesgo “muy alto” solo aparece en un área que no alcanza el 1% del total y es generado por la conjugación de las zonas de amenaza y vulnerabilidad “muy alta” en ambos casos. El grado de riesgo que más porcentaje ocupa dentro del área (44%) es de grado “bajo”, ubicándose principalmente sobre el pueblo de Mucuchíes, y se debe a que en esta zona no hay taludes que amenacen la integridad de las viviendas y la población presente.

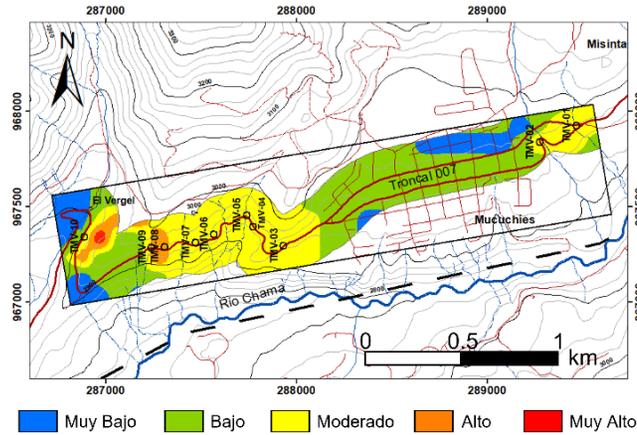


Fig. 11. Mapa de riesgo

6 Conclusiones

En la simulación de los taludes a través del software geotécnico Slide, Como resultado se obtuvo que para todos los taludes las condiciones más desfavorables se obtienen al agregar agua y sismicidad a la simulación, mientras que, al evaluarlos en estado seco y estático, los taludes en su mayoría son “ligeramente estables” tales como TMV-02 (FS promedio=1,226), TMV-04 (FS= 1,4055), TMV-05 (FS= 1,36), TMV-06 (FS= 1,4759), TMV-07 (FS= 1,4967) y TMV-08 (FS= 1,4277); los taludes “estables” son TMV-03 (FS= 1,6912) y TMV-10 (FS= 2,0447); mientras que TMV-01 (FS= 0,866) y TMV-09 (FS= 0,4745) son calificados como “muy inestables”.

Al evaluar la amenaza y plasmarla cartográficamente, se observa que esta varía de “muy baja” a “muy alta” en las adyacencias de la Troncal 007, siendo la más alta en los taludes TMV-01, TMV-05 y TMV-09, debido a sus características geomecánicas. De igual forma se evalúa la vulnerabilidad, obteniéndose que la zona más vulnerable es la cercana al talud TMV-09, por los daños observables de eventos antecedentes, que evidencian que las pérdidas ocasionadas por un deslizamiento en esta zona pueden ser importantes.

Del mapa de riesgo geotécnico se concluye que en un rango de aproximadamente 300 m alrededor de la carretera Trasandina el grado de riesgo es variado, siendo “moderado” (grado III) en el 39% del área, el cual se considera tolerable debido a que la sociedad estaría dispuesta a vivir con él; el riesgo “bajo” (grado II) abarca el 44% del territorio, el cual se considera aceptable y no preocupa a la sociedad, aumentando nuevamente al dirigirse en dirección El Vergel, llegando a riesgo “alto” (grado IV) en los taludes TMV-08 y TMV-09, que se considera un riesgo de fatalidad, por lo que debe ser mitigado con urgencia.

Referencias

- Alvarado, M., Cantos, G., Pérez, E., y Audemard, F. (2015). Cartografía neotectónica de la Falla de Bococonó entre Tabay y La Toma, Mérida - Venezuela. *Boletín de Geología*, 37 (2), 47-55.
- Corpoandes. (2007). Dossier Municipal 2007, Rangel, Mérida. Mérida.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: pearson educación.
- Grauch, R. (1975). Mapa Geológico de la Sierra Nevada, al sur de Mucuchíes.
- Rivas, D. (2016). Elaboración del mapa de riesgo geotectónico en el sector Vuelta de Lola - El Peñón, municipio Libertador del estado Mérida. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Suarez, J. (2012). Deslizamientos: Análisis Geotécnico (Vol. 1). Bucaramanga, Colombia: Univesidad Industrial Santander.
- Tarbutck, E.J. y Lutgens, F.K. (2005): *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología física*. 8ª ed. 710 pp. Pearson Prentice Hall.
- Tricart, J. (Enero - Diciembre de 1966). Geomorfología del área de Mucuchíes. *Revista Geográfica*, VII(16-17), 31-42.

Recibido: 05 de diciembre de 2023

Aceptado: 20 de marzo de 2024

González, Balmari: Ingeniero Geólogo con experiencia práctica en estudios de estabilidad de taludes. Ha trabajado recientemente en la realización de mapas de ubicación para la prospección minera en el estado Bolívar.

<https://orcid.org/0009-0001-4038-0963>

Iglesias, Marya: Ingeniero Geólogo con experiencia práctica en estudios de estabilidad de taludes. Ha trabajado recientemente en la implementación de metodologías para el mapeo de susceptibilidad a movimientos en masa a múltiples escalas. También es responsable del diseño de material didáctico en geoamenazas.

Correo electrónico: maryagrabrielaiz@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-5049-0998>

Rivas, Daniel: Profesor en Escuela de Ingeniería Geológica. ULA. Ingeniero Geólogo. Maestría de Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos en Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).

Correo electrónico: erivasdaniel@gmail.com;

danielrivas@ula.ve

<https://orcid.org/0000-0003-3899-1447>