

Estimación de la estabilidad de un talud a través de los métodos de equilibrio límite y elementos finitos, sector Belén, municipio Libertador, Mérida.

Estimation of the stability of a slope through the methods of limit equilibrium and finite elements, Belén Sector, Libertador municipality, Mérida

Meza, Eizabeth^{1*}; Molina, José¹; Molina, Germán¹; Belandria, Norly¹⁻³; Toro, Rosibeth¹⁻³

¹ Escuela de Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

² Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

³ Facultad de Ciencias, Departamento de Geodinámica Interna, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.

*Eliizabethmr@gmail.com

Resumen

Se estudia la estabilidad de un talud ubicado entre los sectores de Belén y el Espejo, Mérida, Venezuela con amenaza sísmica elevada, por la presencia de la Falla activa Boconó, que, junto con las altas precipitaciones y elevadas pendientes, representan factores desencadenantes donde los taludes son propensos a deslizamientos. A través de los Métodos de Equilibrio Límite (MEL) y de Elementos Finitos (MEF), se busca identificar las zonas más propensas a sufrir daños en caso de un deslizamiento. El talud estudiado está ubicado en una zona geomorfológica desfavorable, por la acción erosiva del río Chama que socava el mismo, generando cárcavas con flujos detríticos que afectan su estabilidad. Para el estudio de la estabilidad del talud, se inicia con la recopilación y revisión bibliográfica, la toma de muestras de suelo para realizar ensayos en laboratorio y el cálculo de sus propiedades y parámetros geomecánicos. Los datos obtenidos sirven para el estudio del comportamiento del suelo y el cálculo del factor de seguridad mediante los programas Slide y Plaxis. Cabe resaltar, que el talud es más inestable para la condición pseudo-estática saturada en ambos programas. Se recomienda implementar bioingeniería como métodos de estabilización de taludes, en la zona superior del talud, donde existen daños a viviendas que se encuentran en peligro, sugiriéndose la biomanta, malla de doble torsión y anclajes pasivos, como propuesta de recomendación para la estabilización del talud estudiado.

Palabras clave: talud, métodos numéricos, programas Slide y Plaxis, factor de seguridad.

Abstract

The stability of a slope located between the Belén and El Espejo sectors, Mérida, Venezuela with high seismic hazard, due to the presence of the active Boconó Fault, which together with high rainfall and steep slopes, represent triggering factors where the slopes are prone to landslides. Through the Limit Equilibrium (LEM) and the Finite Element (FEM) Methods, we seek to identify the area's most prone to damage in the event of a landslide. The slope studied is located in an unfavourable geomorphological zone, due to the erosive action of the Chama river that undermines it, generating gullies with detrital flows that affect its stability. The study of slope stability began with the compilation and review of bibliographic, the collection of soil samples for laboratory tests and the calculation of its properties and geomechanically parameters. The data obtained are used for the study of soil behavior and the calculation of the safety factor through of the Slide and Plaxis programs. It was determined that the slope is more unstable for the saturated pseudo-static condition in both programs. It is recommended to implement bioengineering as slope stabilization methods, in the upper zone of the slope, where there is damage to houses that are in danger, suggesting the biomantle, double torsion mesh and passive anchors, as a proposal of recommendation for the stabilization of the slope studied.

Keywords: Talud, numerical methods, Slide and Plaxis programs, safety factor

1 . Introducción

Los procesos de deslizamientos y los movimientos de materiales, ladera abajo, representan una amenaza natural para zonas urbanísticas. Según Blodgett & Keller, (2007), la mayoría de los movimientos de laderas son pequeños y lentos, pero algunos son grandes y rápidos, siendo ambos causantes de pérdidas de vidas. En las temporadas de mayor precipitación suelen suceder desastres naturales de gran escala, por lo general, ocurren en un corto plazo de tiempo, sin dar oportunidad a la comunidad de tomar medidas preventivas o de evacuación inmediata. Es así como estos eventos desencadenan numerosos desastres, afectando poblados, ocasionando pérdidas humanas y daños materiales.

En la ciudad de Mérida se ha evidenciado en estos últimos años (2019-2023) un aumento en la durabilidad y cantidad de precipitaciones provocando la saturación de los terrenos y su inestabilidad, sobre todo aquellas que se encuentran en los límites de la Terraza, siendo los sectores de Belén y el Espejo de esta ciudad uno de ellos, el cual cuenta para la actualidad con diferentes estudios (Herrera, 2018; Noguera, 2018; Corredor, 2018; Peña y Rosales, 2017; Preconsult, 2013) que demuestran las posibles amenazas y vulnerabilidades, donde se intuye que en temporadas de alta precipitación pueden darse los mayores desastres, ya que los sedimentos presentes de edades recientes y origen fluvial son afectados por agentes erosivos lo que genera deslizamientos de materiales que alteran las condiciones de estabilidad en laderas y taludes. Por lo que se han delimitados las posibles zonas que podrían ser más afectadas (Fig. 1). Sin embargo, la comunidad hace caso omiso a los estudios que se realizan constantemente y siguen sobre poblando, lo cual ha llevado a la construcción inconsciente de viviendas en este sector que se considera una zona de alto riesgo.

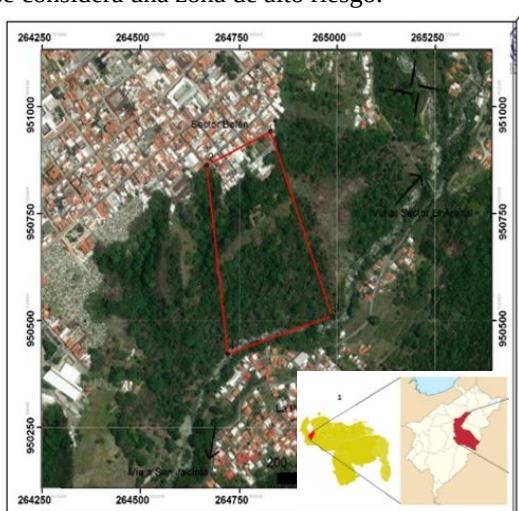


Fig. 1. Ubicación del área de estudio, coordenadas UTM, DATUM WGS84, 19N. (<http://www.meridapreciosa.com/mapa.htm>).
Location of the study area, UTM coordinates, DATUM WGS84, 19N. (<http://www.meridapreciosa.com/mapa.htm>).

La estabilidad de taludes es de gran importancia en obras de ingeniería, por eso, para Beneyto, Gutierrez, Mroginski, Di Rado & Awruch, (2011), ésta se cuantifica a través del cálculo del factor de seguridad, esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, que depende de las cargas actuantes, y de las características geométricas y físicas de la masa de suelo. Algunas de las obras civiles construidas en los sectores ya mencionados, se encuentran en una zona de alta peligrosidad debido a que están en los bordes de los taludes y se observan grietas en sus viviendas por lo que actualmente los habitantes corren el riesgo de perder su vivienda, incluso su vida y no es posible que estos desalojen las mismas ya que se niegan a abandonarlas por circunstancias económicas e inexistentes planes gubernamentales que apoyen y obliguen a esta propuesta.

En esta investigación la importancia de la estabilización de taludes se enfoca en dar soluciones desde el punto de vista geotécnico a problemas presentes en el talud donde están ubicadas estas viviendas de dichos sectores, intentado así prevenir cualquier desastre que puedan afectarlas. Se analizan diferentes métodos de estabilización en busca del más adecuado para la zona en estudio.

2 . Marco Teórico

Un talud (origen artificial) o ladera (origen natural) es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. Según Suarez (2012), están compuestos por una parte alta o superior convexa denominada cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de denudación o erosión; una parte intermedia semirrecta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, pata o base, en la cual ocurren principalmente procesos de deposición.

En la naturaleza se presentan diferentes tipos de movimientos en los taludes, González et al, (2004) los denomina como: *i) deslizamientos*, a los movimientos de masas de suelo o roca que deslizan sobre uno o varios planos inestables, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias o superficies de rotura al superarse la resistencia al corte de estas superficies. *ii) desprendimientos*, a las caídas libres muy rápidas en forma de cuña de bloques o masas rocosas independizadas por planos de discontinuidad preexistentes (tectónicos, superficies de estratificación, grietas de tracción, entre otros) frecuentemente en laderas de zonas montañosas. *iii) Vuelcos*, a los producidos en macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. En general los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí. Este tipo de rotura implica un movimiento de rotación de los bloques. (Fig. 2).

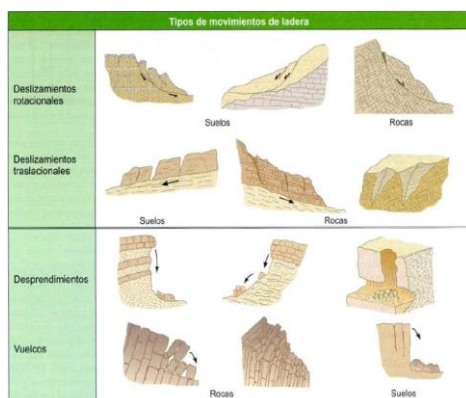


Fig. 2. Clasificación general de los movimientos de laderas. (González et al, 2004).

General classification of slope movements. (González et al, 2004).

Pero para que ocurra este tipo movimiento existen factores condicionantes y desencadenantes. Ayala (1986) menciona que es de primordial importancia su reconocimiento ya que ambos factores permiten una evaluación del peligro existente y, por tanto, las medidas necesarias para evitar o corregir los posibles movimientos. La susceptibilidad de que se produzcan movimientos en los taludes está condicionada por las estructuras geológicas, su litología, condiciones hidrogeológicas y la morfología propia de un área determinada.

En nuestra naturaleza existen factores que pueden comportarse como agentes condicionantes (ejemplo la meteorización) o factores desencadenantes (ejemplo la erosión), uno de ellos es *el agua* que dependiendo del ambiente en que se encuentre puede inclinarse más a uno de estos factores. Así los ríos y oleaje con las corrientes de agua pueden ser un poderoso factor erosivo y su energía de transporte constituye un gran factor desencadenante, tendiendo a conseguir el perfil de equilibrio de las laderas de los valles por los que discurren. También pueden actuar de forma continua y según la intensidad de la corriente, producir socavaciones en el pie de los taludes, eliminando o disminuyendo su soporte en la base e incrementando el esfuerzo de corte en los materiales.

Otra son las aguas subterráneas las cuales dentro del interior de la red de fracturación de un macizo rocoso o de la forma intersticial en los suelos ejercen una serie de disoluciones y otros cambios fisicoquímicos en el terreno, que disminuyen las características resistentes del mismo y condicionan su estabilidad. Las lluvias, constituyen un factor desencadenante de inestabilidades, contribuyendo a aumentar la acción de diversos factores condicionantes: meteorización, acción de las aguas subterráneas, etc. Ayala, (1986), expresa que el impacto de las gotas de lluvia sobre los suelos produce salpicaduras que levantan y dejan caer las partículas, tendiendo a transportarlas hacia niveles inferiores de la vertiente.

Otro factor importante es *la sismicidad*, que es desencadenante a grandes deslizamientos, pudiendo ocasionar daños graves. Por otro lado, *la actividad biológica* no constituye un

factor determinante en estabilidad de los taludes, aunque condiciona de forma notable la acción de otros factores que pueden originar movimientos en los taludes y de las actividades humanas se derivan las causas con mayor incidencia en los movimientos de taludes. Aunque éstos generalmente tienen consecuencias de menor entidad que los producidos por causas naturales que a veces producen daños de mayor cuantía.

El estudio de estos factores se realiza directamente sobre los suelos, que Ayala (1986) los define como el conjunto de partículas sólidas, sueltas o poco cementadas, más o menos consolidadas, de naturaleza mineral, fragmentos de roca, materia orgánica, etc., con fluido intersticial relleno de huecos y que han podido sufrir transporte o desarrollarse «*in situ*». Puntualiza, que el comportamiento de las masas de suelo se asemeja al de un medio continuo y homogéneo. Las superficies de rotura se desarrollan en su interior, sin seguir una dirección preexistente.

3. Metodología

La metodología aplicada para este estudio comienza en identificar el *tipo de suelo*, González *et al* (2002), ha clasificado los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría (Normas D.I.N., A.S.T.M, A.E.N.O.R, etc.): gravas (entre los 10 cm a 2 mm), arenas (entre 2 a 0,060 mm), limos (0,060 y 0,002 mm) y arcillas (>0,002 mm). En segundo lugar, *las propiedades que definen su estado inicial* (porosidad, índice de huecos o de poros, relación entre los volúmenes de huecos y volumen total, peso específico, humedad, grado de saturación, factor de seguridad), para ello se intenta determinar en primer lugar la concentración relativa de sólidos, el volumen relativo de huecos y contenido relativo de agua en un volumen elemental representativo de un punto o zona del suelo.

El factor de seguridad (FS), por otro lado, requiere del cálculo de parámetros particulares como lo es el ángulo de fricción interna (ϕ). González *et al* (2004), lo conceptualiza como la resistencia al deslizamiento causado por la fricción entre las superficies en contacto de las partículas. Este, depende de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y forma de los granos y de la presión normal. Su determinación se hace mediante la Fig. 3 que fue propuesta por Soletanche (Tomado de Ucar, 2010), que correlaciona la cohesión (eje horizontal X) con el ángulo de fricción interna (eje vertical Y) y el valor del coeficiente de balasto (Líneas inclinadas).

La Tabla 1, Rivas, Blandria, Bongiorno & Moreno (2015) proponen valores específicos del factor de seguridad asociados a estabilidad de laderas.

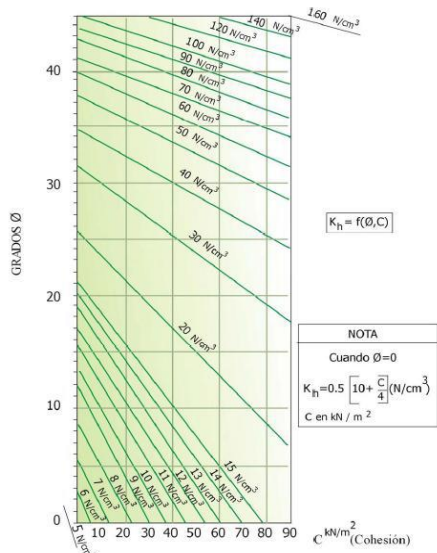


Fig. 3. Valores del coeficiente de reacción o balasto en función de los parámetros de corte, según Soletanche. (Ucar, 2010).
Values of the reaction coefficient or ballast depending on the shear parameters by Soletanche. (Ucar, 2010).

Tabla 1. Valores del factor de seguridad asociados a estabilidad de laderas. (Rivas, Belandria, Bongiorno & Moreno, 2015).
Safety factor values associated with slope stability. (Rivas, Belandria, Bongiorno & Moreno, 2015).

ESTABILIDAD	FACTOR DE SEGURIDAD	CONDICIÓN CINEMÁTICA
MUY ESTABLE	Valores mayores a 2,5	Configuración cinemática activa
ESTABLE	1,5 < FS < 2,5	Cinemática aparentemente inactiva
LIGERAMENTE ESTABLE	1,2 < FS < 1,5	Poca o nula densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales
INESTABLE	1 < FS < 1,2	Media densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales
MUY INESTABLE	FS < 1	Alta densidad e incidencia de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales

La Cohesión (C), es la adherencia entre las partículas del suelo debido a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares y las películas de agua. Para ubicar el valor de cohesión en función del coeficiente de reacción (K), se emplea la Tabla 2 propuesta por Belandria, Bongiorno, Herrera y Úcar para la terraza de Mérida.

Con el auge que ha tomado el método numérico y su uso a través del desarrollo de aplicaciones y programas comerciales (Slope/W, Stable y Talren) en el computador en

los últimos años, prácticamente se ha obligado a su empleo para el análisis de estabilidad de taludes.

Este sistema ha permitido incorporar más información en los modelos de análisis y permite analizar situaciones que no eran posibles con los sistemas manuales, obteniendo de manera rápida y sencilla el Factor de Seguridad de taludes o laderas con cierto grado de complejidad y por cualquiera de los métodos de análisis. Algunos autores emplean el método de elementos finitos y otros emplean el análisis de equilibrio por iteración, siendo este último sistema el mas empleado universalmente.

Tabla 2. Valor de cohesión en función del valor del coeficiente de Balasto. (Belandria *et al*, 2015).
Cohesion value depending on the value of the Ballast coefficient. (Belandria *et al*, 2015).

Coeficiente de Reacción o Balasto (N/cm³)	Cohesión (kN/m²)
Menores a 17	10
17-27	15
27-37	20
37-47	25
47-57	30
57-70	55
70-90	60
90-110	65
110-130	70
130-180	75
Mayores a 180	90

3.1. Método de análisis de estabilidad de taludes.

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación. El sistema de equilibrio límite supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un FS de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Para ello las metodologías disponibles, se encuentran (i) los métodos de límite de equilibrio, (ii) los métodos numéricos y (iii) los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros.

(i) Método de equilibrio límite (MEL), analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basan en: • La selección de una superficie teórica de rotura en el talud. • El criterio de rotura de Mohr-Coulomb. • La definición de coeficiente de

seguridad.

(ii) Análisis por el método de elementos finitos (MEF), el método esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. Estos elementos se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos. El método típicamente utilizado es el de la formulación de desplazamientos, el cual presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente. Aunque es una herramienta muy poderosa su utilización es muy compleja y su uso muy limitado para resolver problemas prácticos. Aunque su utilización no está muy expandida existen algunos programas de análisis de estabilidad de taludes utilizando métodos numéricos. De estos se conocen los programas FLAC, UDEC, PLAXIS entre otros.

(iii.1) Método de Ordinario o de Fellenius, conocido también como método sueco, método de las Dovelas o método de la Oficina de Recuperación de los Estados Unidos o *United States Bureau of Reclamation (USBR)*. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el FS. Las fuerzas que actúan sobre una dovela son el peso o fuerza de gravedad, las fuerzas resistentes de cohesión y fricción, las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas. (Fig. 4).

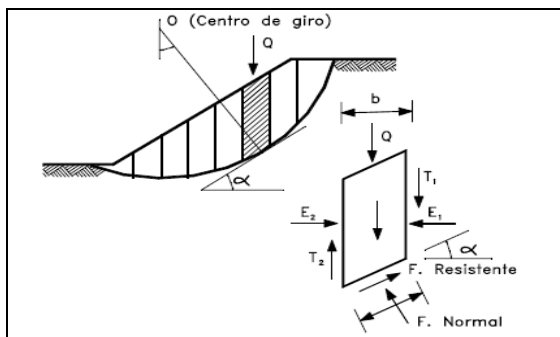


Fig. 4. Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas. (Suárez, 1998)

Fig. 4. Forces acting on a segment in the segment methods. (Suárez, 1998)

(iii.2) Método de Bishop simplificado, para (Ramírez & Alejano, 2004), consiste en dividir la masa deslizante en “n” rebanadas o fajas verticales, para establecer el equilibrio de momento de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo, de la condición de equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada se obtienen las fuerzas normales N (normales a la superficie de rotura), además supone que la superficie de rotura es circular y que las fuerzas de contacto de cada rebanada no influyen por estar equilibradas, obteniendo así el factor de seguridad de la superficie considerada. Es necesario realizar iteraciones hasta obtener el factor de seguridad mínimo.

(iii.3) Método de Janbu simplificado, muy similar al método de Bishop ya que también asume las fuerzas tangenciales a las caras de las rebanadas como nulas, pero en este caso no satisface la ecuación de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbu, conforme a (Ramírez & Alejano, 2004), aplica un factor de corrección para compensar este problema, dicho factor es dependiente de la curvatura de la superficie de falla, considerando que no necesariamente las superficies de falla son circulares en todos los casos. Al igual que Bishop el simplificado, es necesario realizar iteraciones hasta obtener el factor de seguridad mínimo.

3.2. Comparación de los diversos métodos.

La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad. Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbu, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de FS que se obtiene generalmente difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de *Spencer* y de *Morgenstern-Price*. Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, el FS determinado con el método de *Bishop* difiere por aproximadamente el 5% con respecto a soluciones más precisas, mientras el método simplificado de *Janbu* generalmente, subestima el FS hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%.

Slide, es el *software* de análisis de estabilidad de taludes más completo disponible para la evaluación del equilibrio de roturas tanto para curvas circulares como no circulares en taludes de suelo y roca. Es elegido por su simplicidad en el manejo de modelos complejos, donde se pueden crear los taludes y analizarlos rápida y fácilmente, en consideración de las cargas externas, aguas subterráneas de Elementos Finitos, reducción rápida, sensibilidad y análisis probabilístico y diseño de soporte. El *software* analiza la estabilidad de la curva de deslizamiento usando métodos de Equilibrio Límite por medio de rebanadas verticales. (Rocscience, 2016).

Plaxis, es un *software* de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. La interfaz de usuario está constituida por cuatro subprogramas *Input* (Entrada), *Calculations* (Cálculos), *Output* (Resultados) y *Curves* (Curvas)). Este *software* consta de un sistema de CAD, que grafica de manera simple la selección vertical de un modelo geométrico del problema geotécnico, para luego discretizarlo a través de una malla de Elementos Finitos, asignarle las condiciones iniciales, y luego proceder a realizar los cálculos y entregar los respectivos reportes del problema que se modeló.

4. Discusión y Resultados

A partir de la recopilación de información cartográfica se logró realizar un mapa topográfico contentivo de curvas de nivel separadas cada 5 m y cuyas altitudes varían entre los 1610 msnm hasta los 1425. Adicionalmente se obtuvo el mapa de pendientes, caracterizado por pendientes abruptas sobre todo entre las cotas de 1585 hasta 1500 msnm. Ambos mapas ayudaron a determinar la altura del talud la cual oscila entre 185 m.

La geomorfología de la zona es típica de un relieve montañoso marcada por procesos erosivos activos causados principalmente por agentes hídrico, en este caso acentuados por la mala canalización de aguas residuales en la cabecera del talud.

La geología de la zona está caracterizada por sedimentos aluviales del Cuaternario cuyas fuentes de aportes corresponden a la Asociación Sierra Nevada, la Granodiorita del Carmen y las formaciones Sabaneta y Palmarito (Fig. 5). Estos sedimentos recientes están representados por dos unidades principales:

Q3 (Pleistoceno tardío), que son sedimentos con matriz de color anaranjado, de material grueso a medio, de arenas, arcillas arenosas y conglomerados o fragmentos de rocas ígneo-metamórficas provenientes de la Asociación sierra Nevada y la Asociación Mucuchachí.

Q2 (Pleistoceno medio), depósitos gris oscuros, a pardo amarillentos, de sedimentos aluviales y coluviales de material grueso de arenas, gravas, conglomerados y bloques, muy heterogéneos y caóticos, provenientes en su mayoría de la Formación Sabaneta.

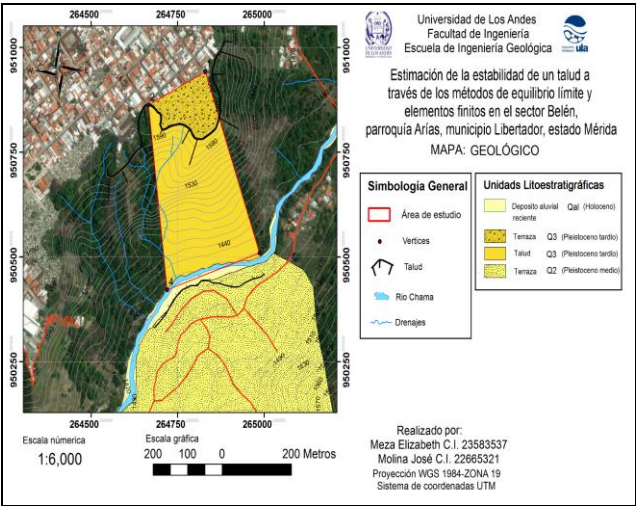


Fig 5. Mapa geológico de la zona de estudio.
Fig 5. Geological map of the study area.

Los resultados obtenidos en laboratorio proporcionaron los siguientes valores para determinados parámetros necesarios en la elaboración de los modelados de los taludes en los programas Slide y Plaxis. (Tabla 3)

Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos.
Summary of the results obtained in the tests.

Ensayos	Muestra #1 Cabecera del talud	Muestra #2 Parte media del talud	Muestra #3 Base del talud
Contenido de humedad:			
W (%)	8,76%	6,40%	12,90%
Peso específico relativo			
Gs 20°	2,68	2,67	2,65
Granulometría			
Gravas (%G)	65,95%	59,98%	56,50%
Arenas (%S)	23,44%	25,43%	22,95%
Finos (%F)	11,11%	14,59%	20,95%
Coefficiente de uniformidad (Cu)	456,75	-	-
Uniformidad	No uniforme		
Coefficiente de curvatura (Cc)	2,74	-	-
Graduación	Suelo bien graduado		
Límites de Consistencia			
Límite Líquido (LL)	30,91%	29,80%	31,3%
Límite Plástico (LP)	26,3%	23,7%	26,6%
Índice de Plasticidad (IP)	3,8%	6,1%	4,7%
Plasticidad:			
1. Sowers & Sowers (1979)	Ligeramente Plástico	Ligeramente Plástico	Ligeramente Plástico
2. Carta de plasticidad de Casagrande	limos y suelos orgánicos de baja plasticidad	limos y suelos orgánicos de baja plasticidad	limos y suelos orgánicos de baja plasticidad
Clasificación del suelo			
Clasificación (S.U.C.S)	GW-GM	GM	GM
Descripción (S.U.C.S)	Gravas bien graduadas, mezcla de grava y arena con pocos fino o sin ellos. - Gravas limosas, mezcla de grava, arena y limo	Gravas limosas, mezcla de grava, arena y limo	Gravas limosas, mezcla de grava, arena y limo
Clasificación (AASHTO)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)
Descripción (AASHTO)	Gravas arenas, limosas y arcillosas	Gravas arenas, limosas y arcillosas	Gravas arenas, limosas y arcillosas
Terreno de fundación	Excelente a bueno	Excelente a bueno	Excelente a bueno

Los valores que se muestran a continuación son los utilizados para los modelados en los *software Slide* (Tabla 4) y *Plaxis* (Tabla 5). La muestra 1 hace referencia a los resultados obtenidos en los ensayos en el laboratorio y los demás datos fueron utilizados según la línea ReMi LR10A proporcionada por FUNVISIS.

Tabla 4. Resumen de los parámetros utilizados para el modelado del talud en *Slide*.
3Summary of the parameters used for slope modeling in Slide.

SLIDE			
Propiedades	Muestra 1	Línea ReMi LR10A	Línea ReMi LR10A
Peso unitario (kN/m³)	17,75	20,01	23,15
Cohesión (kN/m²)	4,40	25	70
Ángulo de fricción interna (°)	27,42	34	42
Profundidad (m)	0-9	18-35	>35

Tabla 5. Resumen de los parámetros utilizados para el modelo del talud en *Plaxis*.

Summary of the parameters used for the slope model in *Plaxis*.

PLAXIS			
Propiedades	Muestra 1	Línea ReMi LR10A	Línea ReMi LR10A
Peso unitario (kN/m ³)	17,75	20,01	23,15
Cohesión (kN/m ²)	4,40	25	70
Ángulo de fricción interna (°)	27,42	34	42
Velocidad onda P (m/s)	1008	1008	2181,89
Velocidad onda S (m/s)	582,02	582,02	1259,75
Módulo de Young (E _a) kN/m ²	1727520,01	1727520,01	9362966,29
Coefficiente de Poisson (ν _d)	0,250	0,250	0,250
Profundidad (m)	0-9	18-35	>35

4.1 Resultados del Factor de Seguridad (FS) de los modelados utilizando el MEL

El *software Slide* permite realizar un modelado para el análisis de taludes en 2D, el FS que se usa como parámetro de estabilidad y se evalúa bajo el MEL, utilizando el criterio de *Mohr-Coulomb*. La Tabla 6 indica los valores del FS obtenidos para cada uno de los modelos, por los diferentes métodos: *Ordinary/Fellenius*, *Bishop Simplified* y *Janbu Simplified* según cada una de las condiciones a las que es sometido el talud modelado, las cuales son: seco, pseudo-estático seco, saturado y pseudo-estático saturado.

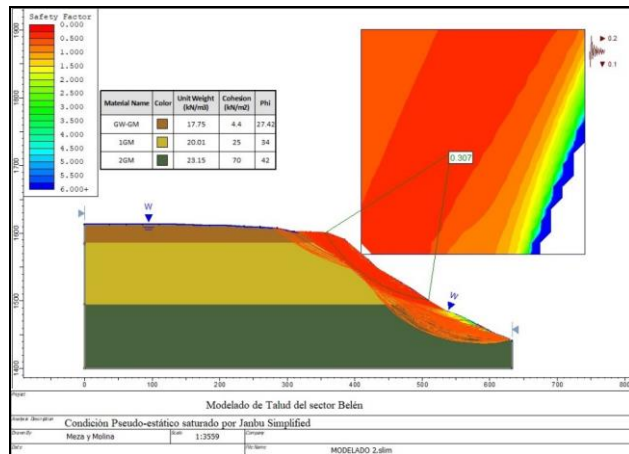


Fig 6. Superficie de rotura del modelo de talud en estado saturado pseudo-estático por Janbu Simplificado.

Fig 6. Failure surface of the slope model in the pseudo-static saturated state by Janbu Simplified.

En la Tabla 6 se puede apreciar que, en todas las condiciones, por el método de “*Janbu Simplified*” el FS es menor en comparación a los métodos de “*Ordinary/Fellenius*” y “*Bishop Simplified*”. Se compararon los resultados con los valores del factor de seguridad asociados a estabilidad de laderas de (Belandria, *et al* 2015), mostrada en la Tabla 6, donde las condiciones pseudo-estático seco, saturado y pseudo-estático saturado, se encuentran en el rango “muy inestable”, ya que los factores de seguridad son menores a 1, en el caso de la condición seco. El talud se encuentra en un rango

“inestable” y para el método Bishop “ligeramente estable” ya que el FS da mayor a 1,2.

Al analizar el factor de seguridad arrojados por el *software Slide*, la estabilidad del talud sin considerar cargas sísmicas, ni la influencia del agua, se obtienen los valores más altos, y estos van disminuyendo a medida que el talud es expuesto a peores condiciones como lo es, el saturado pseudo-estático. También se puede observar que los resultados obtenidos para cada método son muy similares entre sí en magnitud, según sea la condición del talud.

Tabla 6. Valores de FS para cada condición modelada. FS values for each modeled condition.

Condiciones del talud	FS (Factor de seguridad)			Estabilidad (Ver tabla 5)
	Ordinary/Fellenius	Bishop Simplified	Janbu Simplified	
Seco	1,172	1,222	LIGERAMENTE ESTABLE	INESTABLE
Seco pseudo-estático	0,824	0,864	0,820	MUY INESTABLE
Saturado	0,666	0,492	0,440	MUY INESTABLE
Saturado pseudo-estático	0,459	0,345	0,307	MUY INESTABLE

4.2 Resultados del Factor de Seguridad (FS) de los modelados utilizando el MEF

Al obtener los cálculos mediante el uso del subprograma *Calculation* para el modelo en las diferentes condiciones, se obtienen resultados de desplazamiento de masa de suelo, deformación total, esfuerzos totales y efectivos, así como el factor de seguridad. Los valores de los cálculos determinados a partir del *software Plaxis* para cada condición se observan en la Tabla 7. Se debe resaltar que los esfuerzos están con signo negativo (-) esto se debe a que el *software Plaxis* supone el sentido positivo hacia arriba y los esfuerzos van en dirección contraria.

Tabla 7. Resultados del MEF para la simulación del talud en el programa *Plaxis*.

FEM results for slope simulation in *Plaxis* software.

Condiciones del talud	Desplazamiento de masa de suelo (m) x10 ⁻³	Deformación Total (%)	Esfuerzo Efectivo (kN/m ²) x10 ³	Esfuerzo Total (kN/m ²) x10 ³	Factor de Seguridad (FS)	Estabilidad (ver tabla 5)
Seco	15,84	33,04 x10 ⁻³	-4,49	-4,44	1,1613	INESTABLE
Seco Pseudo-estático	44,26	563 x10 ⁻³	-4,49	-4,37	0,8203	MUY INESTABLE
Saturado	41,13	40,98 x10 ⁻³	-2,31	-4,41	0,5630	MUY INESTABLE
Saturado Pseudo-estático	118,60	1,01	-2,40	-4,33	0,4489	MUY INESTABLE

Para las condiciones seco, el FS determinado por el método de elementos finitos indica que el talud es “inestable” siendo este valor mayor a 1, comparándolo con valores del

factor de seguridad asociados a estabilidad de laderas de (Belandria *et al*, 2015). Los valores de esfuerzos efectivos y totales para esta condición son prácticamente iguales, lo cual se atribuye a la ausencia de agua, adicionalmente se observa que los desplazamientos y deformaciones son los más bajos obtenidos.

En la condición seco pseudo-estático se mantiene la configuración inicial, con la diferencia de que se le es asignada las cargas sísmicas. El FS disminuye con respecto al estado anterior, pasando de “inestable” a “muy inestable”. Se observa un aumento en los valores de desplazamiento y deformación.

Para la condición saturado, al modelo se le adiciona el nivel freático en todo el perfil del talud. El FS disminuye y sigue en el rango “muy inestable”, en los resultados se observa como los valores de desplazamiento y deformación aumentan con respecto a la condición inicial, en los esfuerzos efectivos ocurre una disminución con respecto a los esfuerzos totales, debido a la presencia de agua, que genera presiones de poro.

La condición pseudo-estático saturado, en este modelo se simula simultáneamente el comportamiento por efectos de la carga sísmica y por la acción del agua que se incorpora al talud generando su saturación total, obteniéndose el factor de seguridad más bajo siendo “muy inestable”. Los valores de desplazamientos y deformación son los más altos para esta condición e igualmente el esfuerzo efectivo es menos que el esfuerzo total producto de la presencia de agua que crea la presión de poro. (Fig. 7).

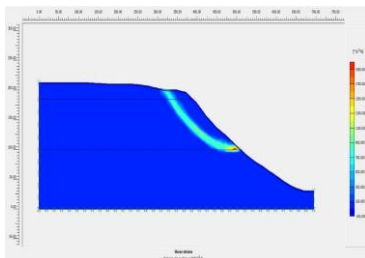


Fig. 7. Superficie de rotura en estado pseudo-estático saturado.
Failure surface in saturated pseudo-static state

4.3 Resultado del Factor de Seguridad (FS) analítico por el MEL para el talud en estudio.

El factor de seguridad obtenido por Slide en estado seco es de 1,17 y el valor analíticamente por la hoja de cálculo es de 1,19, haciendo una comparación entre ambos cálculos la diferencia entre los resultados es de 0,018, ambos valores se encuentran en el rango de “inestable”. De igual forma el factor de seguridad proporcionado por Slide por el método de *Bishop Simplified* para el estado seco es de 1,22 y el obtenido a través de la hoja de cálculo de Excel es de 1,24, la diferencia entre los resultados es de 0,018, ambos valores se en-

cuentran en el rango de “ligeramente inestable”. Al realizar la comparación entre los resultados obtenidos por el software y el método analítico, se puede determinar que los valores que se obtienen a través del software computacional Slide son precisos y confiables, ya que la variación entre los resultados es de poca relevancia.

5. Conclusiones

Con la aplicación del método de Elementos Finitos a través del software *PLAXIS* y el método de Equilibrio Limite a través del software *SLIDE*, donde se analizan cuatro condiciones (elástico-plástica seca, pseudo-estática seca, elástico-plástica saturada y pseudo-estática saturada) que pueden condicionar el comportamiento del talud.

Se analizaron por el software *SLIDE* tres métodos, el método de *Bishop Simplified* y *Ordinary/Fellenius* los cuales arrojan FS mayores con respecto al de *Janbu Simplified*, es decir, que el método *Janbu Simplified* es un método más conservador ya que brinda los factores más bajo para las cuatro condiciones ya mencionadas.

Los resultados obtenidos con el uso del programa *SLIDE* son muy similares en magnitud entre los diferentes métodos utilizados según sea la condición establecida, presentando algunos casos donde la estabilidad del talud está más comprometida. Se tomaron los valores del factor de seguridad por *Janbu Simplified* ya que como se mencionó anteriormente se obtiene el FS con los valores más bajos, por lo que se asocia a la superficie de deslizamiento más desfavorable y al aplicar algún método de estabilidad sería el más confiable.

Para las condiciones seco, se obtuvo un FS 1,159 siendo un talud inestable ya que $FS > 1$, seco pseudo-estático, saturado y saturado pseudo-estático disminuyen con respecto a la condición inicial (seco), posicionándose como un talud muy inestable ($FS < 1$), esto se puede atribuir al peso que adiciona la incorporación de agua al talud y los efectos asociados ante el desarrollo de un sismo con las características presentes en la zona.

Desarrollando la simulación con el software *PLAXIS*, de igual forma, en algunas condiciones se ve más comprometida la estabilidad en los modelos de acuerdo con los resultados obtenidos a través de MEF, para la condición seco un FS 1,1613 siendo el $FS > 1$ es inestable, seco pseudo-estático, saturado y saturado pseudo-estático sus valores de FS disminuyen comparado con la condición inicial pasando a ser muy inestable ya que el $FS < 1$. Esto se puede atribuir el peso que adiciona el agua que se incorpora al talud y a la elevada pendiente, lo cual facilita desplazamientos por acción de la gravedad.

A partir de los valores obtenidos en el factor de seguri-

dad (FS) por los cálculos desarrollados de MEL y MEF procesados a través de los programas computacionales Slide y Plaxis respectivamente. Se evidencia que el talud es más inestable para la condición Pseudo-estática Saturada en ambos programas, lo que permite validar la información obtenida.

Los mayores desplazamientos de masa de suelo representados en los resultados obtenidos a través del método de los elementos finitos simulados a partir del programa Plaxis, se presentan para las condiciones en las que se incorpora agua al talud, es decir en condiciones saturada y pseudo-estática saturada, esto se puede asignar al peso que añade el agua al talud y a la elevada pendiente que facilita el desplazamiento de la masa de suelo por acción de la gravedad. Así como los desplazamientos totales aumentan bajo las mismas condiciones ya mencionadas, estando relacionado a que a mayor desplazamiento de la masa de suelo mayor será la deformación.

Los resultados obtenidos en los esfuerzos efectivos del *software Plaxis*, se mantienen iguales para las condiciones en el que el modelo de talud se encuentra seco, aun cuando se le adiciona el sismo ($4,49 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$), al incorporar agua los valores disminuyen, esto es debido a que el esfuerzo efectivo toma en cuenta la presión de poros en el agua. A diferencia de los esfuerzos totales donde los valores se mantienen relativamente iguales aun cuando hay incorporación de sismo y de agua, lo cual se debe a que el programa *Plaxis* solo toma en cuenta el peso del material en general, por lo que los valores mantienen prácticamente el mismo valor.

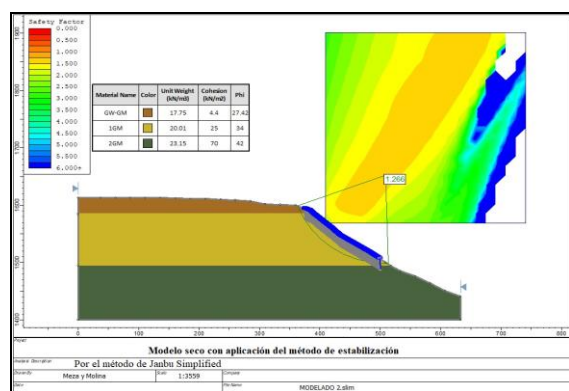


Fig. 8. Modelo seco: aplicación del método de estabilización a través de barras de acero

Dry model: application of the stabilization method through steel bars

Recomendaciones

La zona crítica tiene aproximadamente 80 m de altura con 25 m de ancho abarcando un área de 2000 m^2 . Con valores obtenidos y comparados se recomienda la implementación de diferentes métodos de estabilización para el control de erosión y deslizamientos en el talud de los sectores Belén-Espejo los siguientes:

- En la zona de la cárcava (presente en la cabecera del talud) se propone eliminar la descarga existente de las aguas servidas de la comunidad, para evitar que continúe la erosión y la socavación en el talud, implementando un sistema de drenaje superficial, constituido por canaletas tipo prefabricadas.
- Instalar canoas y bajantes para la captación y manejo de las lluvias con el fin de controlar las aguas procedentes de las cubiertas o techos de las viviendas, evitando que el impacto de estas aumente los procesos erosivos y el movimiento en masa que se produce en la zona.
- Remover la basura y escombros que se encuentran en la parte superior del talud, caracterizada por tener alta pendiente, con el fin de evitar la sobrecarga en el terreno que produce como consecuencia, una pérdida de resistencia en el suelo.
- Implementar métodos de estabilización de taludes basados en la bioingeniería y más en específico la siembra de la planta vetiver o la utilización de biomantos, principalmente en la zona superior del talud donde ya se han observado daños a las viviendas, las cuales se encuentran en peligro. Este método consta de un revestimiento biodegradable producido con fibras naturales, pero con vida útil suficiente para desarrollar esta función, la cual es de servir de protección y abono para las especies vegetales que serán sembradas en el talud (tal como la planta Vetiver).
- Debido a la inclinación presente en el área de estudio, el cual oscila entre 40-80 % se recomienda el uso de una red de malla hexagonal de doble torsión, para mantener estable la biomanta, debido a que el agua de lluvia puede dejarla muy pesada e inestabilizarla.
- El cubrimiento debe realizarse cuidando la dirección de escurrimiento de agua. De acuerdo con las medidas realizadas en campo y a través de fotografías aéreas, al talud se aplicará el método 25 m de ancho y 80 m de longitud, de esto se obtiene un área de 2000 m^2 , se deben instalar 132 barras de acero y 40 rollos de malla de doble torsión aproximadamente.
- También se puede estabilizar el talud mediante barras de acero (Fig.8), en el cual el FS aumenta a 1,27, siendo esta una recomendación un poco más costosa pero a la vez más segura.
- Realizar monitoreo y control de movimiento en masa en la zona más afectada del talud, para simular las deformaciones o deslizamientos superficiales en el terreno mediante la instalación de anclajes firmes de elementos como estacas, postes, varillas, y otros, medibles con equipos de fácil control como cintas métricas o cuerdas; con esto, se puede lograr pronosticar el comportamiento del terreno en función de los movimientos durante ciertos períodos de tiempo. Sugiriéndose que el método de estabilización propuesto sea evaluado por entes públicos para su implementación

Referencias

- Ayala, F. A. (1986). Manual de Taludes. Instituto Geológico y Minero de España (IGME) & Empresa Estudios y proyectos técnicos industriales. España: S.A (EPTISA).
- Beneyto, P., Gutiérrez, G., Mroginski, J., Di Rado, H., & Awruch, A. (2011). Análisis de estabilidad de taludes mediante técnicas de optimización. Heruística. Mecánica Computacional, 2001-2014.
- Blodgett, R., & Keller, E. (2007). Riegos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Madrid: Pearson.
- Corredor, A. (2018). Análisis de los taludes ubicados entre el sector Belén y La Mara a través de Métodos Numéricos. [Trabajo Final de Grado]: Universidad de los Andes.
- Díaz, Y., & López, E. (2008). Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Punta Arenas: Universidad de Magallanes.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson.
- Herrera, F. (2018). Vulnerabilidad Geotécnica del borde de la Terraza de Mérida. Mérida, [Magister Scientiae]: Universidad de Los Andes.
- Noguera, V. (2018). Análisis geotécnico de la estabilidad de taludes a lo largo del río Albarregas desde el sector El Rodeo hasta el viaducto Campo Elias, Mérida, Estado Mérida, Venezuela. Mérida, [Trabajo Final de Grado]: Universidad de Los Andes.
- Peña, M., & Riveros, A. (2012). Análisis de la Terraza de Mérida por medio del método elementos finitos en los tramos Las Tapias - Zumba para determinar el riesgo por efectos sísmicos. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Proconsult. (2013). Estudio de ingeniería de suelos y estabilidad de taludes en la Estación Barinitas del Sistema Teleférico de Mérida. Mérida, Venezuela: Proconsult.
- Ramírez, P., & Alejano, L. (2004). Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes. Madrid: Red DESIR.
- Rivas, D., Belandría, N., Bongiorno, F., & Moreno, S. (2015). Mapa de Riesgo Geotécnico con Fines de Urbanismo en la Vía de Mérida-Jají. Estado Mérida: Fundamentals to Applications in Geotechnics, 2498-2959.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia: Publicaciones UIS.
- Suárez, J. (2012). Deslizamientos. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial Santander.
- Ucar, R. (2010). Sistema de transporte masivo para el área metropolitana de Mérida - Línea 3 Trocable en la

ciudad de Mérida. Venezuela: Tromerca.

Recibido: 14 de febrero de 2023

Aceptado: 07 de julio de 2023

Meza, Elizabeth: Ingeniero. Geólogo 2021. Estudiante de M.Sc Planificación y desarrollo de los recursos hidráulicos.  <https://orcid.org/0009-0007-0100-1581>.

Molina, José: Ingeniero. Geólogo 2021. Correo electrónico: rafaelmolina19jr@gmail.com  <https://orcid.org/0009-0006-7954-7018>

Molina, Germán: Ingeniero. Geólogo 2011. Estudiante de M.Sc Planificación y desarrollo de los recursos hidráulicos, Docente universitario 2014, Jefe del departamento de geomecánica 2018 hasta la presente. Correo electrónico: gmolinab@ula.ve  <https://orcid.org/0009-0003-7684-5835>.

Belandría, Norly: Ing. Geólogo 2003, M.Sc. en Matemática Aplicada a la Ing. 2008, Dr. en Ciencias Aplicadas, Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA). Correo electrónico: norlyb@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-9485-0860>

Toro-Mora, Rosibeth: Especialista en Gestión de Abastecimiento, recolección y tratamiento de agua (CIAT-ULA) y doctorado en Ciencias Geológicas (Zaragoza-España). Profesora en el área de geología de campo y colaborador en Hidrogeología y Geofísica en la Escuela de Ingeniería geológica de la ULA-Mérida. Correo electrónico: ingrosibethtoro@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1252-3584>