

# Método de Elementos Finitos para el análisis de la falla de Boconó en Mesa de Los Indios, estado Mérida, Venezuela

Método dos Elementos Finitos para análise da falha de Boconó em Mesa dos Índios, estado de Mérida, Venezuela

Finite Element Method for analysis of the Boconó Fault, Mesa de los Indios, Mérida State, Venezuela

**Jackeline Coromoto Peña Suárez<sup>1</sup>, Marisela Sánchez Ávila<sup>2</sup>, Jesús Alberto Torres Hoyer<sup>3</sup>, Ricardo Picón Rodríguez<sup>4</sup>, Wilmer José Barreto<sup>5</sup> y Roberto José Torres Hoyer<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Temuco, Chile

<sup>2</sup> Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Geomecánica / Alcaldía de Campo Elías, Gerencia de Infraestructura, Mérida, Venezuela

<sup>3</sup> Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación GEOKIMÜM / Universidad de Los Andes, Grupo de Investigación de Geología Aplicada (GIGA), Mérida, Venezuela

<sup>4</sup> Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación GEOKIMÜM / Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), Departamento de Estructuras, Decanato de Ingeniería Civil, Barquisimeto, Venezuela

<sup>5</sup> Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación GEOKIMÜM / Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Decanato de Ingeniería Civil, Barquisimeto, Venezuela

[jpena@uct.cl](mailto:jpena@uct.cl); [marisesa.162@gmail.com](mailto:marisesa.162@gmail.com); [j.torresa@uct.cl](mailto:j.torresa@uct.cl); [wbarreto@uct.cl](mailto:wbarreto@uct.cl); [rtorres@uct.cl](mailto:rtorres@uct.cl)

Peña: <https://orcid.org/0000-0001-6025-6428>

Sánchez: <https://orcid.org/0009-0006-0089-4579>

Torres J.: <https://orcid.org/0000-0002-3573-8350>

Picón: <https://orcid.org/0000-0001-6356-7360>

Barreto: <https://orcid.org/0000-0002-1861-0742>

Torres R.: <https://orcid.org/0000-0002-3701-2561>

**Resumen**

La población de la Mesa de Los Indios, en el estado Mérida, Venezuela, está afectada por la falla de Boconó, que causa deslizamientos y daños en viviendas y vías. Un estudio geológico que incluyó análisis de campo y laboratorio permitió obtener propiedades geomecánicas, para generar simulaciones con el Método de Elementos Finitos. Por medio de los resultados se identifican zonas, calibrando el modelo y con ello las zonas de mayor amenaza, alineadas con áreas dañadas y permitiendo calcular la dirección de esfuerzos en la región y el comportamiento. Estos hallazgos facilitan la planificación de infraestructura y viviendas en zonas vulnerables, mejorando la comprensión del comportamiento geomecánico local.

**PALABRAS CLAVE:** simulación geomecánica; elementos finitos; falla geológica; susceptibilidad.

**Resumo**

A população de Mesa de Los Índios, no estado Mérida, Venezuela, é afetada pela falha de Boconó, que causa deslizamentos e danos em casas e estradas. Um estudo geológico, incluindo análise de campo e de laboratório, forneceu propriedades geomecânicas, utilizando simulações com o Método de Elementos Finitos. Os resultados identificam áreas de maior risco alinhadas com zonas danificadas, validando o modelo e permitindo inferir a direção das tensões na região. Esses achados facilitam o planejamento de infraestrutura e moradias em áreas vulneráveis, melhorando a compreensão do comportamento geomecânico

**PALAVRAS-CHAVE:** simulação geomecânica; elementos finitos; falha geológica; suscetibilidade.

**Abstract**

The population of Mesa de Los Indios, in Mérida State , Venezuela, is affected by the Boconó Fault, which causes landslides and damage to homes and roads. A geological study, including field and laboratory analysis, provided geomechanical properties, using simulations with the Finite Element Method. The results identify high-risk areas aligned with damaged zones, validating the model and allowing for inference of stress direction in the region. These findings support planning for infrastructure and housing in vulnerable areas, improving the understanding of local geomechanical behavior.

**KEYWORDS:** geomechanical simulation; finite elements; geological fault; susceptibility.

## 1. Introducción

Con el rápido avance en el poder computacional, los ingenieros y geocientíficos han visto un aumento considerable en la capacidad para resolver problemas geomecánicos de alta complejidad que son críticos para la seguridad, la exploración de recursos y la mitigación de riesgos en regiones afectadas por fallas geológicas activas. Uno de los métodos numéricos destacados para abordar estos desafíos es el Método de los Elementos Finitos (MEF), el cual ha demostrado ser útil para la simulación de condiciones de esfuerzos y desplazamiento en zonas de fallas, tanto en estudios de ingeniería estructural como en aplicaciones geológicas avanzadas, incluyendo el análisis del riesgo. El MEF permite a los investigadores observar y prever cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones en los terrenos, algo fundamental para evaluar la estabilidad de estructuras en áreas sísmicamente activas y prever posibles riesgos geotécnicos (Uzcátegui, s/f; Zhou *et al.*, 2009).

Estudios previos han resaltado la utilidad del MEF en la simulación de fallas tectónicas. Por ejemplo, investigaciones sobre el movimiento de fallas sísmicas han logrado reproducir con precisión la magnitud de sismos en la superficie terrestre y subrayar la relevancia de la llamada zona de proceso. Al incluir esta zona en el modelo, se mejora notablemente la respuesta del modelo en relación a la zona sísmica en áreas adyacentes a las fallas. Este enfoque ha sido aplicado exitosamente para simular grandes terremotos en Tottori (Japón), o en Venezuela (Mérida), proporcionando un marco para entender la dinámica de sismos similares en otras regiones tectónicamente activas. Pero en primera instancia se requiere realizar reconocimientos en campo que permitan detectar los desplazamientos y obtener la información necesaria para el modelado, la cual se realiza empleando el Programa ABAQUS (Fukushima *et al.*, 2010; Torres e Infante, 2004; Elberg, 2002).

Por otra parte, se ha utilizado el MEF en la evaluación de riesgos de emanaciones de agua subterránea en minería sobre fallas en estratos

de carbón. Estas investigaciones revelan que la configuración geométrica de las fallas tiene un impacto directo en la susceptibilidad a la filtración y el colapso, un riesgo significativo en operaciones mineras. Los resultados muestran que la zona intacta, rodeada de zonas de fracturas inducidas por la minería, es clave para prevenir emanaciones de agua, lo cual resulta fundamental para la planificación y mitigación de riesgos en estos entornos (Lianchong *et al.*, 2011).

De manera similar, el MEF en tres dimensiones se ha aplicado para explorar cómo las fallas de deslizamiento horizontal afectan la distribución de tensiones y la calidad de los reservorios en yacimientos de metano en formaciones de carbón, tales como las de la Formación Shanxi. En este caso, las simulaciones destacan que la magnitud de las tensiones varía considerablemente a ambos lados de la falla, influyendo en las propiedades petrofísicas del reservorio y afectando la capacidad de producción de los pozos de extracción de gas. La segmentación de la tensión horizontal mínima *in situ* también impacta en la ubicación óptima de pozos, lo que proporciona información crucial para la planificación de la explotación de recursos en zonas de fallas complejas (Yina *et al.*, 2019). Además, los modelos muestran que la orientación y configuración de las fallas impactan significativamente la concentración de tensiones, lo que afecta la eficiencia de extracción de recursos en diferentes secciones de la zona de falla.

En estudios regionales, como los realizados en el noreste de la India y la cuenca de Bengala, el MEF ha permitido simular la distribución de esfuerzos y el patrón de fallas en zonas tectónicas altamente activas. Los resultados subrayan la importancia de la falla de Dauki, que influye aproximadamente el 25% del desplazamiento superficial regional. Los patrones de esfuerzo simulado reproducen las condiciones tectónicas observadas en la región, evidenciando la interacción entre las fallas de deslizamiento y deformación, y proporcionando

un marco para comprender la dinámica sísmica en el noreste de India y las cordilleras Indo-Burma. Este tipo de simulaciones no solo contribuyen a la predicción de riesgos sísmicos, sino también a la evaluación de deformaciones regionales que afectan la infraestructura y la habitabilidad de estas áreas (Islam *et al.*, 2011). De igual manera, se ha usado el MEF en la simulación de la falla La Hechicera, Mérida-Venezuela, realizando un modelo ideal elástico, pero las aproximaciones de los modelos generados, permiten establecer analogías para las estructuras conformadas en niveles estructurales superiores (Cabello y Navarrete, 2005).

Actualmente, el conocer e interpretar los mecanismos de la naturaleza resulta fundamental para el emplazamiento seguro de las distintas obras de ingeniería, considerando que cada día la población se ubica en regiones más susceptibles a desastres de origen natural. La Simulación Geomecánica es una herramienta que sirve de gran ayuda para resolver problemas complejos, los cuales no tienen solución analítica (Torres e Infante, 2004) En el subtramo San Juan de Colón–San Félix de la Autopista San Cristóbal–La Fría, Táchira-Venezuela, se empleó el MEF. Como base para el análisis de estabilidad, de los taludes, que en conjunto indica que es factible realizar el conjunto de análisis a proponer, por lo que ha sido incluido en softwares comerciales dentro de sus análisis continuos (Torres y Torres, 2013).

La población de la Mesa de los Indios se encuentra en el municipio Campo Elías, estado Mérida, Venezuela, a 1.427 msnm, la cual ha sido afectada por deslizamientos, con diversos daños a la infraestructura. Uno de los factores que intervienen en estos problemas es la falla de Boconó, la principal estructura geológica que atraviesa los andes venezolanos (Gordones y Meneses, 2001) y que tiene una de las trazas en un área cercana a la población mencionada (Ramírez-Gil, *et al.*, 2023; Bellizzia y Pimentel, 1994).

En este trabajo, se presenta un análisis detallado del comportamiento de las fallas geológicas mediante el uso del Método de los

Elementos Finitos, al integrar información geológica detallada con simulaciones numéricas, donde se obtienen resultados concluyentes sobre los patrones de distribución de tensiones y desplazamientos en distintos tipos de fallas y configuraciones de geología estructural. Estos hallazgos no solo destacan la importancia de considerar las características específicas de cada zona de falla, sino también la necesidad de integrar factores adicionales como la heterogeneidad del campo de tensiones y la configuración geométrica de la falla, para analizar comportamientos precisos y útiles para la ingeniería geotécnica y la gestión de riesgos en áreas vulnerables. Este análisis proporciona así un marco sólido para la evaluación y mitigación de riesgos en zonas con actividad tectónica significativa, y ofrece una valiosa guía para futuros estudios en la simulación geomecánica de fallas complejas (Chollett, 2023).

## 2. Metodología

La investigación constó de 4 etapas fundamentales; la primera, preliminar, donde se revisó el material bibliográfico, cartográfico, aerofotográfico, entre otros, del área en estudio, que permitieron tener el comportamiento de los esfuerzos que actúan en la zona de estudio. Posteriormente, una etapa de campo FIGURA 1, donde se realizó un recorrido exhaustivo de la zona de estudio para identificar los lugares donde se desarrollaron estudios más específicos caracterizando los materiales presentes, que alimentaron el modelo.

Las zonas de mayor interés fueron caracterizadas en función de sus materiales, pasando al análisis de laboratorio para suelos o macizos rocosos, donde se describieron detalladamente y se tomaron las muestras necesarias. Los materiales fueron sometidos a una serie de mediciones y ensayos de laboratorio para caracterizarlos. Para los materiales sueltos se empleó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y clasificación de los macizos rocosos mediante el Índice de Resistencia Geológica (GSI), (Hoek y Brown, 1997; Bienawski, 1979; González, *et al.*,

2004); adicionalmente a la clasificación fueron tomados datos cuali y cuantitativos de las discontinuidades y matriz rocosa, que permitieron, junto a los ensayos de laboratorio,

obtener las propiedades a utilizar en el modelo, para finalmente realizar las simulaciones pertinentes en las zonas de interés.



FIGURA 1. Medición en terreno para el modelado, estrías y movimiento de la falla

Las muestras recolectadas fueron tratadas de manera diferente según su naturaleza; para los suelos se realizaron los ensayos de granulometría (ASTM D-422), límites de consistencia (ASTM D-4318), para la clasificación mediante el SUCS (Badillo y Rodríguez, 2004), además de determinar su peso específico, contenido de humedad natural y resistencia a la compresión simple (ASTM D-2166), tal y como se aprecia en la FIGURA 2. Por su parte, a las muestras de matriz rocosa se les realizaron los ensayos de compresión uniaxial y densidad. En estos modelos se trabajaron con cuarcitas de la Asociación Tostós y Areniscas de la Formación

La Quinta, aflorantes en el Sector Mesa de Los Indios, Mérida, Venezuela.

En el proceso de modelado y simulación se utilizó el software ABAQUS. Un análisis por el MEF consta principalmente de tres etapas: la primera elaboración del modelo que debe replicar las condiciones observadas para mantener la correspondencia con el medio geológico; la segunda el procesamiento de las ecuaciones resultantes, y por último; la presentación y análisis de los resultados obtenidos (Chandrupatla y Belengundo, 1999; Vasiljević, 2023).



FIGURA 2. Ensayos de compresión inconfiada de rocas y suelos del sector Mesa de Los Indios

Las condiciones de borde impuestas replican lo observado en terreno, seleccionando un bloque que se empotra y el segundo se coloca de manera que se permita un movimiento transcurrente dextral, cónsono con el sistema de fallas presente junto con las cargas generales que replican la presión litoestática en ambos modelos (FIGURA 3). También se aplican las cargas asociadas a las viviendas en el sector

correspondiente; el mallado se realiza con elementos hexagonales tridimensionales, lineales de integración reducida, C3D8R, se cuidan las relaciones de forma de los elementos. Por último, se realiza el análisis numérico de todos los parámetros definidos en la etapa anterior a través del Método de Elementos Finitos.

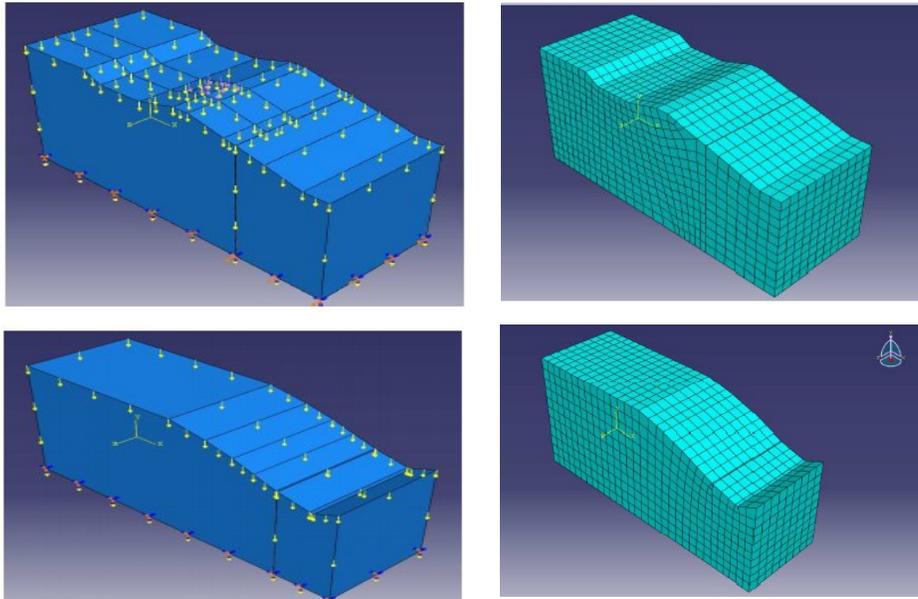


FIGURA 3. Mallado, cargas y condiciones de borde para los modelos considerados

### 3. Resultados y análisis

Las interpretaciones de las fotografías aéreas, junto con los levantamientos de campo, evidenciaron el comportamiento de la traza de la falla de Boconó en el sector Mesa de Los Indios, estado Mérida, Venezuela, esto en función de afloramientos encontrados midiendo desplazamientos, así como geofomas estudiadas en un contexto regional y local.

En el afloramiento de cuarcitas de la Asociación Tostós del sector en estudio, se

identificaron tectoglifos del tipo estrías de falla, con orientación NE-SW, la deformación de los minerales permitieron ratificar el sentido del movimiento de la falla.

El grado de fracturamiento de los macizos rocosos en el área es un indicativo del nivel de esfuerzos tectónicos presentes, lo cual permite, medir la dirección de dichos esfuerzos, información que se utilizó para la calibración del modelo (TABLA 1 y 2).

TABLA 1. Propiedades geomecánicas utilizadas en los modelos elásticos

Material	Peso Específico (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson
Cuarcita	2630	5.98x10 <sup>4</sup>	0.16
Arenisca	2620	3.14x10 <sup>4</sup>	0.25

Cada modelo se calibró utilizando la variable U2, que representa el desplazamiento en el eje Y (para efectos prácticos vertical); se refinó el mallado hasta alcanzar los valores medidos en campo.

Se determinaron por medio de los cálculos correspondientes en el método, el

desplazamiento, los esfuerzos (S), las deformaciones (E). De los resultados del modelo 1, analizaron, a mayor detalle la deformación y los esfuerzos máximos principal (FIGURA 4 y TABLA 2).

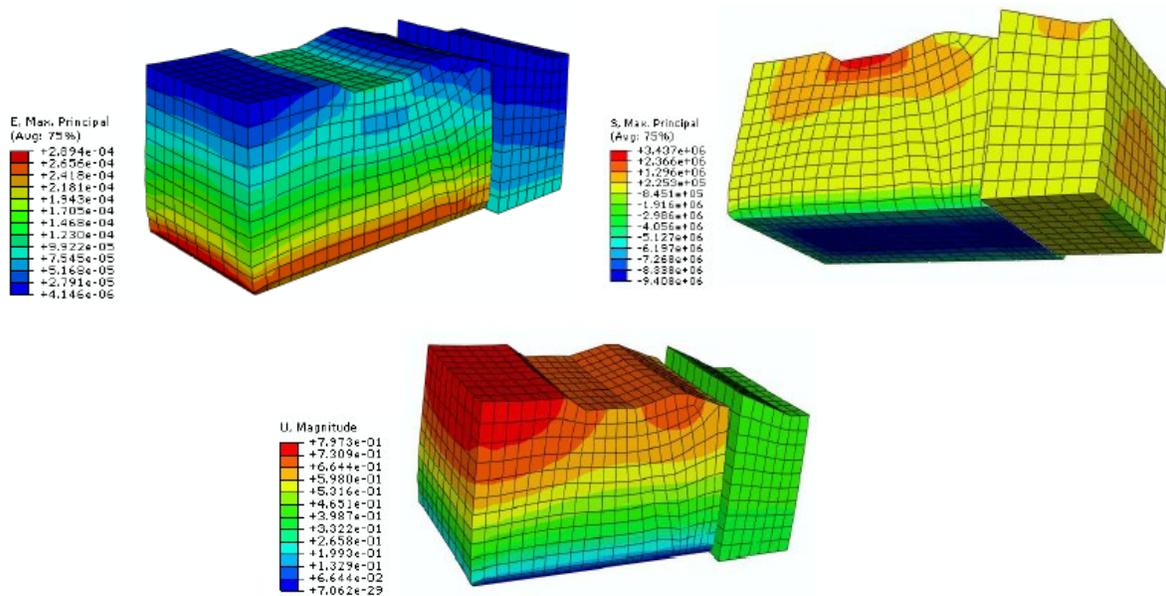


FIGURA 4. Desplazamientos, esfuerzos y deformaciones calculados para el modelo 1

TABLA 2. Resultados del modelo simulado por el Método de Elementos Finitos. Modelo 1

	Max	Min	X	Y	Z	XZ
Deformación	$2,89e^{-4}$	$-2,218e^{-5}$	$3,044e^{-3}$	$-1,321e^{-3}$	$2,845e^{-4}$	$2,350e^{-5}$
Esfuerzo	$-9,408e^6$	$-8,549e^5$	$-1,011e^7$	$-4,436e^7$	$-1,033e^7$	$2,952e^5$
Desplazamiento U	Total		$-1,701e^{-1}$	$-7,868e^{-1}$	$3,796e^{-1}$	
			$7,973e^{-1}$			

Los resultados del modelo 2 (FIGURA 5 y TABLA 3), permitió analizar el comportamiento de los desplazamientos medidos en terreno, determinando así los niveles de deformación y esfuerzos a los que se someten los materiales. Tras medir la deformación en el terreno y revisar las propiedades mecánicas de los materiales, se

ajustó el número de elementos en concordancia con las características de los materiales en el modelo idealizado. Este modelo, elaborado a partir del modelo de elevación digital, facilitó la comparación directa con los datos medidos en campo, y observables en la FIGURA 6.

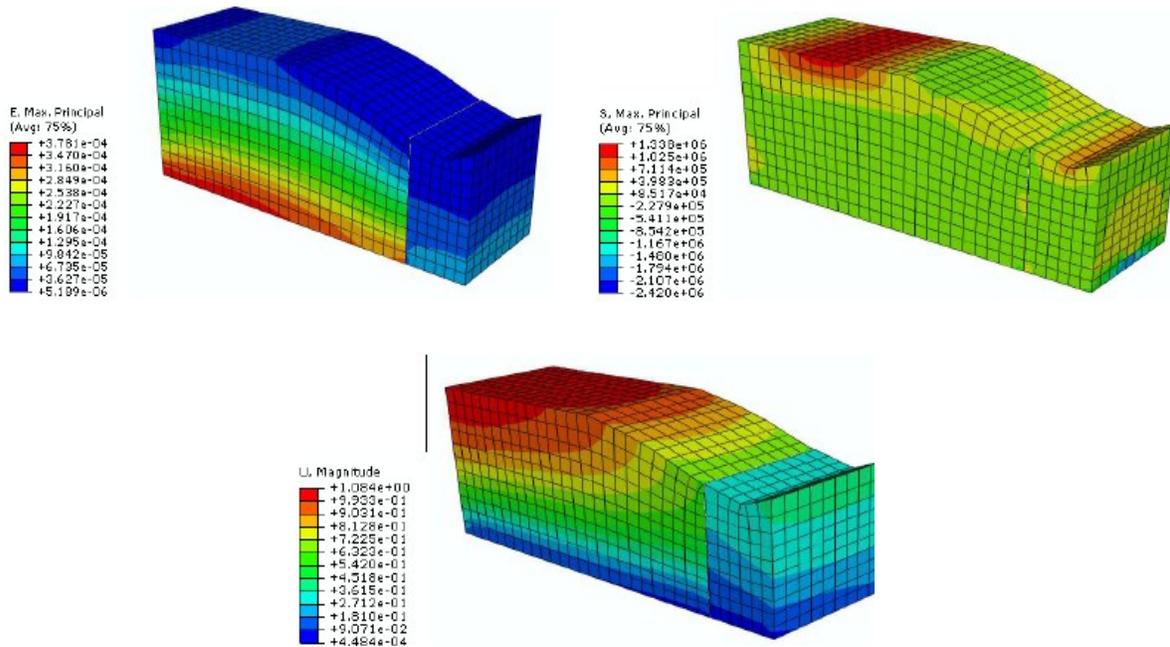


FIGURA 5. Desplazamientos, esfuerzos y deformaciones calculados para el modelo 2

TABLA 3. Resultados del modelo simulado por el Método de Elementos Finitos. Modelo 2

	Max	Min	X	Y	Z	XZ
Deformación	$3,781e^{-4}$	$-2,55e^{-5}$	$3,041e^{-4}$	$-1,474e^{-3}$	$-3,779e^{-4}$	$1,100e^{-5}$
Esfuerzo	$-2,420e^6$	$-4,893e^7$	$9,670e^6$	$-4,816e^{-7}$	$-2,420e^6$	$-1,861e^5$
Desplazamiento U	Total		$-2,391e^{-1}$	$-1,063$	$-3,416e^{-1}$	
			$1,084$			



FIGURA 6. Desplazamientos, y deformaciones en el área de estudio

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Luego de haber modelado el área de estudio y sus adyacencias se puede decir que el patrón de comportamiento se mantiene en todos los modelos. Las deformaciones y los esfuerzos actúan de manera máxima en las mismas zonas, con algunas variantes como es el caso del modelo al que se le admite la carga sobre la base del poblado, así como la vergencia de los esfuerzos es la misma.

De manera general, en los modelos se observó que al desplazarse el bloque de las cuarcitas, las areniscas comienzan un proceso de asentamiento, esto explica los problemas en la vialidad que sufre el pueblo, así como también las viviendas que son afectadas y tienen grandes daños estructurales (Odreman y Ghosh, 1980; Bellizzia y Pimentel, 1994).

Con los valores obtenidos y la distribución de los mismos se puede decir que la traza de la falla de Boconó es la que controla estructuralmente el área, esto explica todos los indicios que se observan en la zona, así como también los valores obtenidos. En cuanto a la afectación del pueblo de la Mesa de Los Indios es importante tener en cuenta los desplazamientos que se generan.

Otro rasgo importante entre los modelos son los desplazamientos ya que, para los modelos realizados, el máximo ocurre a lo largo del eje Y, con valores por el orden de los 1,2m, todos con mayor ocurrencia en la parte superior del modelo.

En el modelado se tomó en consideración a la topografía del lugar, siendo este un factor importante a tener en cuenta, para llevarlos a generar modelos más cercanos a la realidad.

En cuanto a los esfuerzos los mismos actúan en conjunto, ya que siempre hacia la base, los esfuerzos son compresivos, mientras que en el tope, actúan como esfuerzos de tracción. A diferencia de ese comportamiento de manera general de los modelos.

Es necesario realizar estudios de vulnerabilidad y riesgo de la población, de manera de concientizar a las autoridades de las zonas con mayor vulnerabilidad.

Por otra parte, se debe analizar la infraestructura y evaluar las condiciones de habitabilidad para evitar que existan problemas ante un evento desencadenante de la amenaza.

## 5. Agradecimientos

Se agradece a María Elisa Elberg, por su aporte a la investigación, a todo el personal de los Laboratorios de Rocas de la Escuela de Ingeniería Geológica, de Materiales y Ensayos y de Mecánica de Suelos y Pavimento de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Los Andes, así como por su valiosa colaboración en el tratado de muestras durante esta investigación.

## 6. Referencias citadas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Ensayos de granulometría, ASTM D-422*. Disponible en: [astm.org](http://astm.org).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Límites de consistencia, ASTM D-4318*. Disponible en: [astm.org](http://astm.org).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Compresión uniaxial, ASTM D-2166*. Disponible en: [astm.org](http://astm.org).

BADILLO, J. y R. RODRIGUEZ. 2004. *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa. México DF.

BELLIZZIA, A. y N. PIMENTEL. 1994. Terreno Mérida: Un cinturón alóctono Hersiniano en la cordillera de Los Andes de Venezuela. *V Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera Cuencas Subandinas*, Memoria, pp. 271-290. Venezuela.

BIENAWSKI, Z. 1979. The geomechanics classification in rock engineering applications. In: *Proc. 4th International Conference on Rock Mechanics*. Vol. 2. Montreaux. Balkema, Switzerland.

CABELLO, D. y M. NAVARRETE. 2005. *Simulación geomecánica de la falla de la Hechicera a partir de un modelo Elastoplástico en base al Método de Elementos Finitos*. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

CHANDRUPATLA, T. y A. BELENGUNDO. 1999. *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería* (2° Edición). Pearson Educación. México.

CHOLLETT, E. 2023. "Seismic risk in Barquisimeto. Learning from the catastrophe in Turkey". *Gaceta Técnica*, 25(1): 78-92. Disponible en: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica251.5>.

ELBERG, M. 2002. *Proceso automatizado de refinamiento H-Adaptativo basado en índices de energía de deformación*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Postgrado de Ingeniería Estructural. Mérida, Venezuela.

FUKUSHIMA, K.; KANAORI & Y. F. MIURA. 2010. "Influence of fault process zone on ground shaking of inland earthquakes: Verification of Mj= 7.3 Western Tottori Prefecture and Mj= 7.0 West Off Fukuoka Prefecture earthquakes, southwest Japan". *Engineering Geology*, 116: 157-165. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.08.006>.

- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. y C. OTEO. 2004. *Ingeniería Geológica*. Editorial Person Prentice Hall. Madrid, España.
- GORDONES, G. y L. MENESES. 2001. "La representación de lo femenino y masculino en la iconografía prehispánica de la cordillera de Mérida, Venezuela". *Otras Miradas*, 1(1): 97-107.
- HOEK, E. & T. BROWN. 1997. "Practical estimates of rock mass strength". *Int J Rock Mech Min Sci*, 34(8):1.665-1.186. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).
- ISLAM, S.; SHINJO, R. & J. KAYAL. 2011. "The tectonic stress field and deformation pattern of northeast India, the Bengal basin and the Indo-Burma Ranges: A numerical approach". *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(1): 121-131. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.08.015>.
- LIANCHONG, L.; TIANHONG, Y.; ZHENGZHAO, L.; ZHU WANCHENG, Z. & T. CHUNAN. 2011. "Numerical investigation of groundwater outbursts near faults in underground coal mines". *International Journal of Coal Geology*, 85: 276-288. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.12.006>.
- ODREMAN, O. y S. GHOSH. 1980. "Estudio paleoambiental-paleontológico de facies de la Formación La Quinta, cerca de Mérida". *Boletín Geológico de Venezuela*. Caracas, Venezuela.
- RAMÍREZ-GIL, F.; DELGADO-MEJÍA, A.; FORONDA-OBANDO E. & L. OLMOS-VILLALBA. 2023. "Thermal finite element analysis of complex heat sinks using open-source tools and high-performance computing". *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, (106): 124-133. Disponible en: <https://www.doi.org/10.17533/udea.redin.20220888>.
- TORRES, R. y E. INFANTE. 2004. *Influencia en las condiciones locales en la respuesta sísmica: Simulación geomecánica y aplicación a ejemplos naturales*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida, Venezuela.
- TORRES, J. y R. TORRES. 2013. *Análisis de estabilidad cuasi-tridimensional de un talud de suelo empleando el Método de Elementos Finitos: Autopista San Cristóbal-La Fría, Venezuela*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida, Venezuela.
- UZCÁTEGUI, M (s/f). *ABAQUS, Programa de Elementos Finitos*. Cecalcula. Mérida, Venezuela.
- VASILJEVIĆ, R. 2023. "Numerical methods and their application in dynamics of structures". *Vojnotehnicki glasnik/Military Technical Courier*, 71(2): 452-472. Disponible en: <https://doi.org/10.5937/vojtehg71-42781>.
- YINA, S.; XIEC, R.; WUD, Z.; LIUE, J. & W. DINGF. 2019. "In situ stress heterogeneity in a highly developed strike-slip fault zone and its effect on the distribution of tight gases: A 3D finite element simulation study". *Marine and Petroleum Geology*, 99: 75-91. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.10.007>.

ZHOU, Y.; HU, C. & Y. CAI. 2009. "Influence of an inhomogeneous stress field and fault-zone thickness on the displacements and stresses induced by normal faulting". *Journal of Structural Geology*, 31: 491-497. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.03.018>.

---

Lugar y fecha de finalización del artículo:  
Temuco, La Araucanía, Chile; noviembre, 2024