

Autores

Jonathan Vázquez García¹, Aldo Fernández Limés², Isaida Flores Berenguer³, Jenny García Tristá⁴

¹Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Calle 114/ciclovía y rotonda. email: jonathavazgar@civil.cujae.edu.cu

²Máster en Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Calle 114/ciclovía y rotonda. email: afernandezlimes@gmail.com

⁴Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Calle 114/ciclovía y rotonda. email: isiflores92@gmail.com

⁴Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Calle 114/ciclovía y rotonda. email: jennygt83@gmail.com

RESUMEN

Los deslizamientos de taludes son un fenómeno que afecta la economía de una región, por lo cual, para ser evitados, se debe tener un profundo conocimiento de este. Con el desarrollo tecnológico, la aparición de las imágenes satelitales multiespectrales, han hecho más fácil la identificación de zonas con riesgo de deslizamientos. Esta técnica, junto con programas como el MIDAS GTS NX y el Global Mapper, permiten la identificación del posible deslizamiento y el análisis de estabilidad de taludes naturales. Este estudio analiza un deslizamiento ocurrido en Santiago de Cuba, en un terreno caracterizado por un modelo constitutivo Hoek Brown Generalizado, empleando las técnicas de percepción remota, para luego evaluar el nivel de inestabilidad que presentaba el mismo después del colapso y demostrar la veracidad del empleo de estas técnicas. Los resultados demuestran la efectividad del empleo de las técnicas de percepción remota para identificar laderas naturales con riesgo de colapso.

Palabras claves: Estabilidad de taludes, Global Mapper, MIDAS GTS NX, Modelo Hoek Brown Generalizado, Técnicas de percepción remota.

ABSTRACT

Slope landslides are a phenomenon that affects the economy of a region, so in order to prevent them, a deep knowledge of them is required. With technological development, the appearance of multispectral satellite images has made it easier to identify areas at risk of landslides. This technique, together with programs such as MIDAS GTS NX and Global Mapper, allow the identification of possible landslides and the analysis of the stability of natural slopes. This study analyzes a landslide that occurred in Santiago de Cuba, in a terrain characterized by a Generalized Hoek Brown constitutive model, using remote sensing techniques, to then evaluate the level of instability that the landslide presented after the collapse and demonstrate the veracity of the use of these techniques. The results demonstrate the effectiveness of the use of remote sensing techniques to identify natural slopes at risk of collapse.

Keywords: Slope stability, Global Mapper, MIDAS GTS NX, Generalized Hoek Brown model, Remote sensing techniques.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de las técnicas de percepción remota se ha convertido con el tiempo en una alternativa para el reconocimiento de zonas en riesgo de deslizamientos de masas de suelo [1-4]. En un principio, las imágenes aéreas fueron la principal fuente de datos para la detección de deslizamientos, empleándose luego, las imágenes satelitales de alta resolución, las cuales permiten detectar características del terreno como la forma, tamaño, configuración y textura a través de la inspección visual [5]. Luego, con el desarrollo de métodos computacionales, como la segmentación de umbral, detección del cambio y la clasificación supervisada y no supervisada [6], la identificación de deslizamientos de masas de tierra ha sido más fácil.

Los dispositivos de percepción presente en los satélites son capaces de determinar el nivel de divergencia presente en la firma espectral de la superficie del terreno y a través de estos sensores, es posible detectar y mapear cambios en la superficie del terreno. Además, son capaces de obtener informaciones multiespectrales (valores de reflectancia en porciones definidas del espectro electromagnético) empleadas para la construcción de mapas e imágenes derivadas, entre los cuales se encuentran los mapas de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Estos mapas son empleados como información complementaria o directamente como una herramienta para la identificación de deslizamientos [5].

En la actualidad, con los efectos del cambio climático, los deslizamientos han sido mucho más comunes, razón por la cual estas técnicas han sido empleadas con mayor frecuencia, principalmente en el continente asiático donde se agrupa el 75% de los deslizamientos [6]. Fallas en la masa de suelo como la ocurrida en la provincia de Sichuan en China, fueron analizadas empleando entre otras herramientas, mapas NDVI, adquiridos de imágenes satelitales [7], corroborando de esta forma, el potencial de dichas técnicas para predecir fallas en la masa de suelo. . Otros autores como Mila [8] demostraron el uso de un marco técnico de teledetección para identificar posibles deslizamientos en China, Xu, et al. [9] estableció un proceso para la extracción y análisis de parámetros de estructuras rocosas tridimensionales y Mahdi, et al. [10] analizó un deslizamiento en China empleando técnicas de percepción remota.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se evalúa la efectividad de las técnicas de percepción remota para analizar la estabilidad de laderas naturales. Para ello se toma como caso de estudio la estabilidad de una ladera natural ubicada en la provincia de Santiago de Cuba en el municipio Tercer Frente, donde ocurrió un desprendimiento de rocas y tierra en abril del 2023. Según informes de prensa [11], la falla ocurrió en horas de la tarde del 21 de abril en la carretera principal que da acceso a la cabecera municipal a 1km de la localidad de Cruce de Baño, dejando incomunicadas a más de 30 mil personas. La falla ocurrió en la altura de Cruce Prieto, en un terreno fuertemente accidentado y predominantemente rocoso, a poca altura por encima de la carretera, como se puede observar en la Figura 1.



Figura 1. Fotos tomadas del deslizamiento en Cruce Prieto.

Existen muchos factores (naturales y humanos) que pueden condicionar varios tipos de deslizamientos en la masa de suelo [5]. Uno de los principales es la acción del agua como agente capaz de expandir el suelo rocoso, o en el caso de suelos granulares, aumentar el peso del mismo, provocando la desestabilización del terreno [5]. Por otra parte, la disminución de la vegetación aumenta el riesgo de falla, dado que las raíces aportan refuerzo a la masa de suelo, además de que evita la infiltración de las lluvias en el terreno [5]. Sin embargo, el aumento drástico en la vegetación, en un corto período de tiempo, es una señal de fuertes precipitaciones, y aunque aumente la vegetación, el suelo puede saturarse y fallar [5]. En el caso estudiado, se visualiza un desprendimiento de las rocas que conformaban la ladera, lo cual ocurrió de forma repentina y puede deberse entre otras razones producto de la acción de las precipitaciones.

Para el análisis de la ladera se llevará a cabo la identificación de la zona en falla a través de técnicas de percepción remota, empleando el sitio web Copernicus Data Hub [12], [13], que permite obtener imágenes satelitales multiespectrales para cuantificar la humedad y vegetación del suelo con el empleo de combinaciones de bandas. Luego empleando el programa de análisis geotécnico MIDAS GTS NX se evalúa el factor de seguridad de la zona accidentada.

Para la obtención de las imágenes se debe seleccionar en el Copernicus Data Hub la zona de interés, el intervalo de tiempo en el que se desea obtener las imágenes, así como los satélites de los que se quiere obtener, descargando en este caso las correspondientes al Sentinel-2 L2A, debido a la fiabilidad en los estudios de deslizamientos realizados con dicho satélite [7]. Además de que este nivel proporciona productos de reflectancia superficial corregidos atmosféricamente. Para este estudio es necesario analizar los cambios ocurridos en la vegetación y la humedad del terreno, que se logra con la toma de imágenes satelitales que contengan zonas próximas al lugar del suceso. En este caso se tomaron imágenes en un área de 110x110 km² en geometría cartográfica de un mes antes y después de la falla, además de otras más distantes, de seis meses antes y después del suceso.

Para el análisis de las imágenes, se realizó el procesamiento de las mismas con las combinaciones de bandas, a través de la herramienta de cálculo rasterizado (proceso en el que se calcula cada pixel) de imágenes del programa Global Mapper, [14], [15]. Entre las posibles combinaciones, se emplearon las que corresponden al NDVI y al índice de agua de diferencia normalizada (NDWI por sus siglas en inglés).

El NDVI es uno de los primeros productos analíticos de percepción remota empleados para revelar la información que se encuentra en las imágenes multiespectrales, siendo el más empleado para analizar el índice de vegetación [16]. Al igual que todos los índices para simplificar información, el NDVI se caracteriza por delimitar rápidamente la vegetación y el índice de la misma, siendo por lo tanto muy empleado en la agricultura y estudios de suelo. Matemáticamente el NDVI se calcula empleando la expresión que se muestra en la Ecuación 1 en una calculadora Raster.

$$N_{DVI} = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

Donde todas las variables son mediciones tomadas por los sensores, siendo el término NIR la banda infrarroja cercana (espectro que no es visible por el ojo humano) y el término RED se refiere a la luz roja visible por el ojo humano. Los valores de NDVI se encuentran en un rango de -1 hasta 1. Siendo de forma general los valores negativos para cuerpos de agua, los cercanos a cero para rocas o arenas y los positivos para la vegetación, incluyendo arbustos, pastos y bosques [16].

El NDWI, al igual que el NDVI es un índice que revela información contenida en las imágenes multiespectrales, empleado para analizar el índice de agua superficial a través de la delimitación de cuerpos de agua de imágenes satelitales [17]. Por esta razón es usado en estudios de suelo y principalmente en el estudio de sequía de los recursos naturales. El rango de valores que se obtiene oscila de igual forma de -1 hasta 1, siendo los valores positivos los que corresponden a cuerpos de agua y los negativos a zonas con bajo nivel de agua superficial [17].

Las expresiones empleadas para determinar el NDVI y el NDWI a partir de las imágenes del Sentinel 2, se muestran en las ecuaciones 2 y 3 respectivamente.

$$NDVI = (B8 - B4)/(B8 + B4) \quad (2)$$

$$NDWI = (B3 - B11)/(B3 + B11) \quad (3)$$

Donde las variables corresponden a las bandas que componen las escenas satelitales. Estas fórmulas solo son aplicables a las imágenes obtenidas del Sentinel 2, ya que estas son las que corresponden a las bandas espectrales (B) para la combinación requerida, otros satélites presentan un código diferente para cada banda, por lo que mientras que en el Sentinel 2, el término B8 corresponde a la banda infrarroja cercana, otro satélite puede presentar ese término en otra banda. A continuación, se muestran los cambios de vegetación en el terreno (Figura 2).

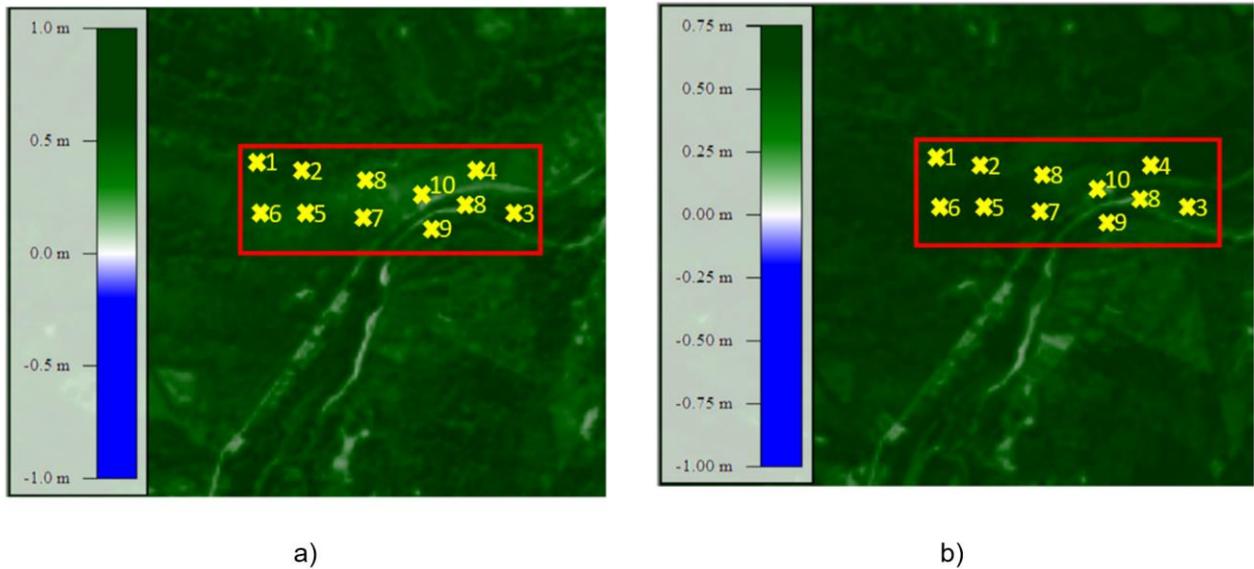


Figura 2: Modelo NDVI de a) un mes antes b) un mes después.

Dentro del recuadro que se observa en la Figura 2, se muestra la zona en donde ocurrió el colapso de la ladera y diez puntos donde se tomaron las mediciones. Se puede observar que la Figura 2 a), presenta tonos más claros con relación a la b) de acuerdo a la escala cromática, lo que demuestra un aumento en el nivel de vegetación de la zona. Considerando este resultado, y teniendo en cuenta que el aumento fue en un período de dos meses, la principal causa debe ser las fuertes precipitaciones ocurridas en la zona durante los días próximos al colapso de la ladera. En la Figura 3 se muestra el comportamiento del NDVI para cada uno de los puntos definidos en la Figura 2.

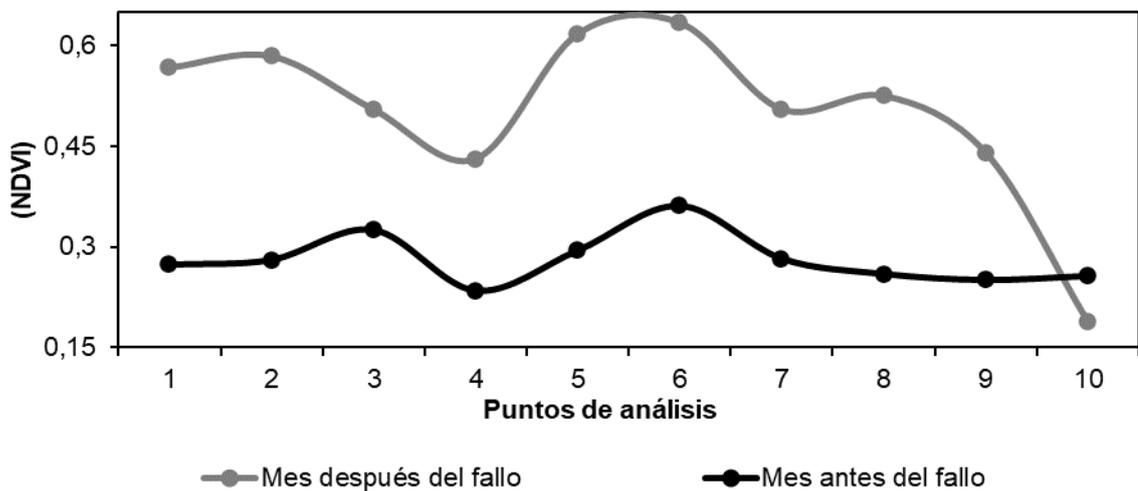


Figura 3. Comportamiento del NDVI.

En la Figura 3 se aprecia el aumento de la vegetación de una fecha a la otra, evidenciando que hubo un incremento en las precipitaciones en ese periodo. Sin embargo, a pesar del aumento en la vegetación, en el punto 10 (punto donde ocurrió la falla), presenta una disminución en el índice de vegetación de 0,256 a 0,187, debido a que la vegetación de esa zona fue arrastrada junto con el resto del material producto del deslizamiento ocurrido. La razón por la que no hubo una disminución gradual del NDVI, es que la zona es rocosa, por lo que, en lugar de ocurrir deslizamientos graduales, ocurren desprendimientos, los cuales no suceden en largos períodos de tiempo sino de forma repentina.

Por este motivo, además de evaluar una ladera teniendo en cuenta la variación en la vegetación, se debe considerar el índice de humedad, para ello a continuación en la Figura 4, se muestran los resultados del NDWI, tomados en los mismos 10 puntos.

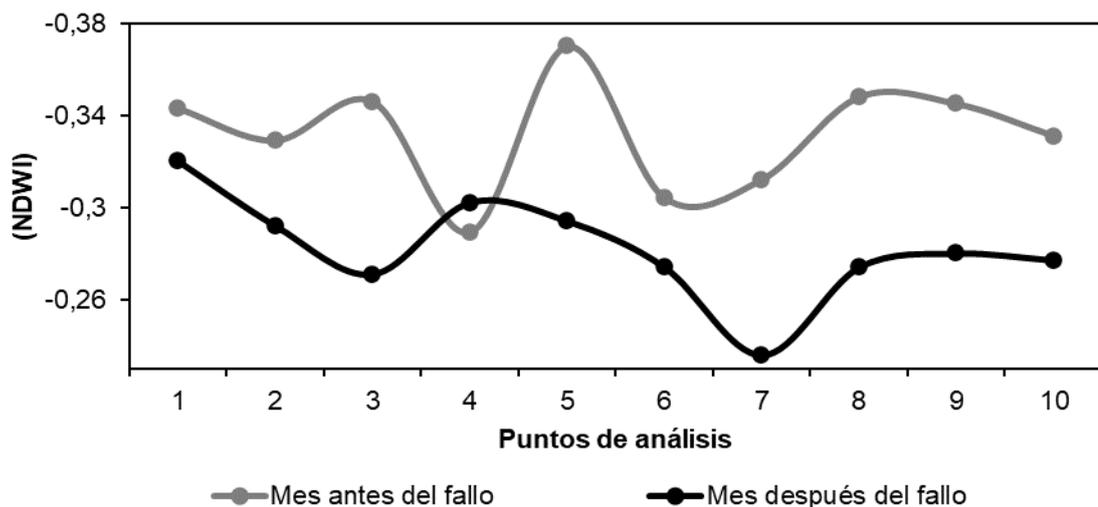


Figura 4. Comportamiento del NDWI.

Como se puede observar en la Figura 4, en este caso existe un ligero incremento en la humedad del terreno en la zona donde ocurre la falla. Sin embargo, en el punto 4, ocurre una disminución en la humedad superficial, lo cual puede suceder cuando ocurre un escurrimiento más rápido del agua debido a la permeabilidad del suelo, o cuando la vegetación absorbe mucha humedad. Mientras que en la zona del fallo ocurre lo contrario, aumenta la humedad, ya que, al disminuir la vegetación, se reduce la capacidad de absorber humedad en la zona. Todo el análisis realizado fue a partir de los datos obtenidos, ya que no fue posible llevar a cabo la inspección visual en el terreno. Para definir si la causa fue realmente la supuesta anteriormente, se obtuvieron los registros de lluvias del embalse Carlos Manuel de Céspedes, ubicado a 7km del lugar donde ocurrió el desprendimiento. Se debe precisar que estas precipitaciones no necesariamente son las que ocurrieron en la zona analizada, pero sirven como referencia para analizar el comportamiento lluvioso de esta región en esos días. Los valores mostrados en la Figura 5 son los que corresponden a una semana antes y después de la falla para el análisis del comportamiento meteorológico que se asume que es similar al que hubo en la zona de Cruce Prieto.

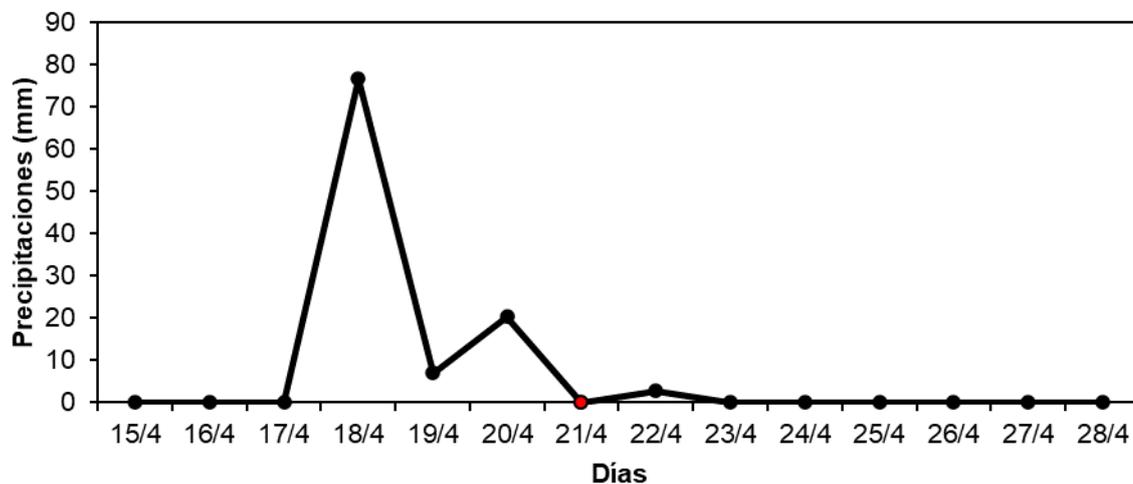


Figura 5. Comportamiento de las precipitaciones.

En la Figura 5, es evidente el incremento de las precipitaciones en los días previos al 21 de abril (día de la falla, resaltado en color rojo), ocurriendo precipitaciones de hasta más de 70mm. Además, del 18 al 20 de abril, hubo una acumulación de casi 100mm de lluvia, siendo probablemente el desencadenante del desprendimiento de rocas en esa zona.

Sin embargo, las técnicas de percepción remota solo permiten la identificación de la zona donde es probable que ocurra la falla, pero no se alcanza a determinar qué tan inestable es el talud analizado. Esto se puede complementar con otras herramientas como el MIDAS GTS NX, el cual permite evaluar la estabilidad de la zona en riesgo a través de la representación de laderas naturales.

El área designada para el análisis de la estabilidad del talud comprende 920m², la cual fue extraída del sitio web CADMAPPER [18-21]. Esta plataforma permite la extracción de curvas de nivel de cualquier zona del planeta. Dentro del área extraída, se seleccionó una zona de 20m² que corresponde al lugar donde ocurrió la falla. En la Figura 6 se muestra la topografía del terreno y sus curvas de nivel.

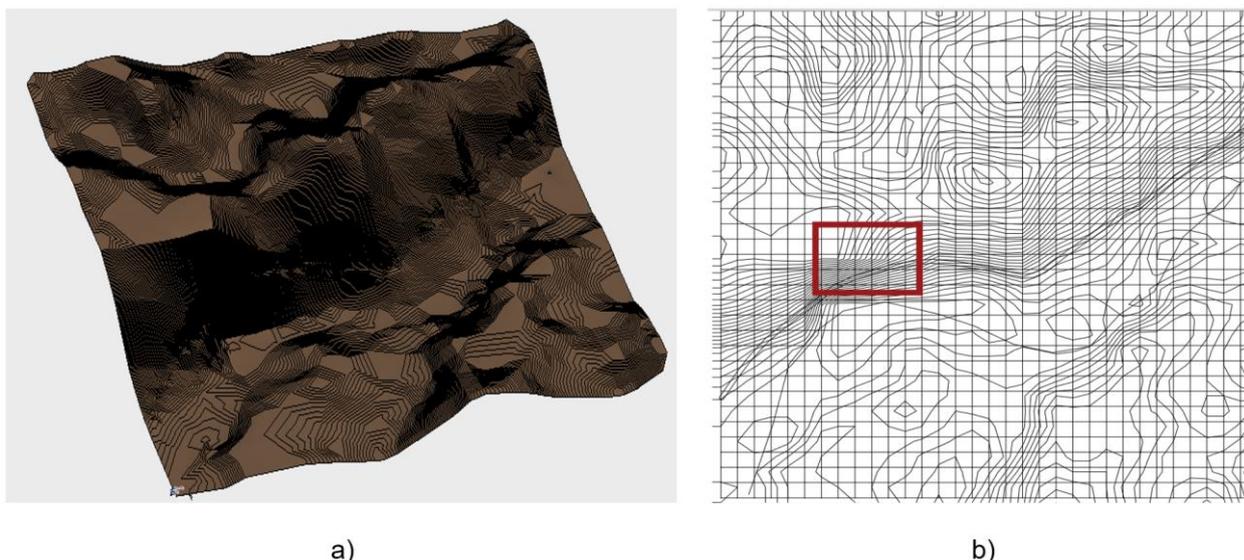


Figura 6. Representación de la superficie topográfica del área estudiada.
 a) Modelo TIN tridimensional con curvas de nivel
 b) Modelo vectorial bidimensional de curvas de nivel.

Dada la ubicación de la ladera, el perfil del suelo se consideró homogéneo y predominantemente rocoso. El mismo presenta un módulo de elasticidad de 27000 MPa , un coeficiente de Poisson de $0,25$ y un peso específico de 21 kNm^3 . Debido a la composición del suelo, el modelo constitutivo que mejor se adapta al mismo es el Hoek Brown Generalizado, el cual ha sido utilizado por autores como [22-29].

El Hoek Brown convencional es un modelo constitutivo que simula el comportamiento de macizos rocosos, los cuales son más rígidos que el suelo y sus parámetros resistentes dependen del grado de meteorización que presente el mismo [30]. Este modelo asume el concepto de equivalencia continua para definir el fenómeno de disminución de tensiones en la falla de macizos rocosos articulados. Este método define la fuerza a compresión no confinada que el modelo Mohr-Coulomb no es capaz de tener en cuenta. Sin embargo, debido a la no linealidad en el criterio de falla del modelo, métodos como el de reducción de esfuerzos, no pueden ser empleados [30].

Por otra parte, el Hoek Brown Generalizado puede proporcionar una predicción precisa de fallas en masas homogéneas e isotrópicas con pocas discontinuidades o masas rocosas muy unidas [25]. Además, el modelo vincula el criterio empírico a las observaciones geológicas mediante uno de los esquemas de clasificación de macizos rocosos establecidos. A diferencia del Hoek Brown convencional, el modelo generalizado es compatible con el método de reducción de esfuerzos y la implementación de este método con el Hoek Brown Generalizado, es conocido como el método de reducción de esfuerzos no lineal (NSRM, por sus siglas en inglés) [25]. Por lo tanto, para este análisis se empleará el modelo generalizado, debido a la compatibilidad que presenta con el Método de Reducción de Esfuerzos (SRM por sus siglas en inglés). Este método no requiere conocimiento previo del lugar donde debe ocurrir la falla, y puede ser empleado en superficies tanto tridimensionales como bidimensionales [31].

En el caso del Hoek Brown Generalizado, al igual que en el convencional, el nivel de agrietamiento que presenta el macizo se define a través del parámetro de roca intacta (m). El nivel de fragmentación que presente la roca es considerado con el GSI (Índice de Resistencia Geológica). Mientras que el factor de perturbación (D), es otro de los valores a tener en cuenta. Para simular este caso en el MIDAS GTS NX, se consideró que el material estaba conformado predominantemente por una caliza micrítica, cuyo valor de m es 8 . Por otra parte, se consideró que el material se encontraba perturbado, formando bloques angulares, y que las condiciones superficiales eran pobres (superficie altamente erosionada), lo que significa que el GSI es de aproximadamente 30 . Además, en el terreno se llevaron a cabo voladuras para la construcción de la carretera, por lo que se adoptó un factor de perturbación de $0,7$, ya que este es el sugerido en el caso de taludes, donde se pudieron haber llevado a cabo voladuras de forma adecuada.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para una buena precisión en los resultados es necesario realizar un proceso de calibración matemática donde se puedan fijar los parámetros más adecuados que definen el dominio numérico analizado. Para ello, se elaboraron 15 modelos disminuyendo gradualmente el tamaño de los elementos del dominio suelo de 15m hasta 2m, deteniendo la corrida por ser el modelo que la capacidad de cómputo permitió. De cada corrida se obtuvieron los factores de seguridad empleando el SRM. A continuación, en la Figura 7 se muestran los factores de seguridad (FS) obtenidos para cada uno de los tamaños de elemento analizados del modelo.

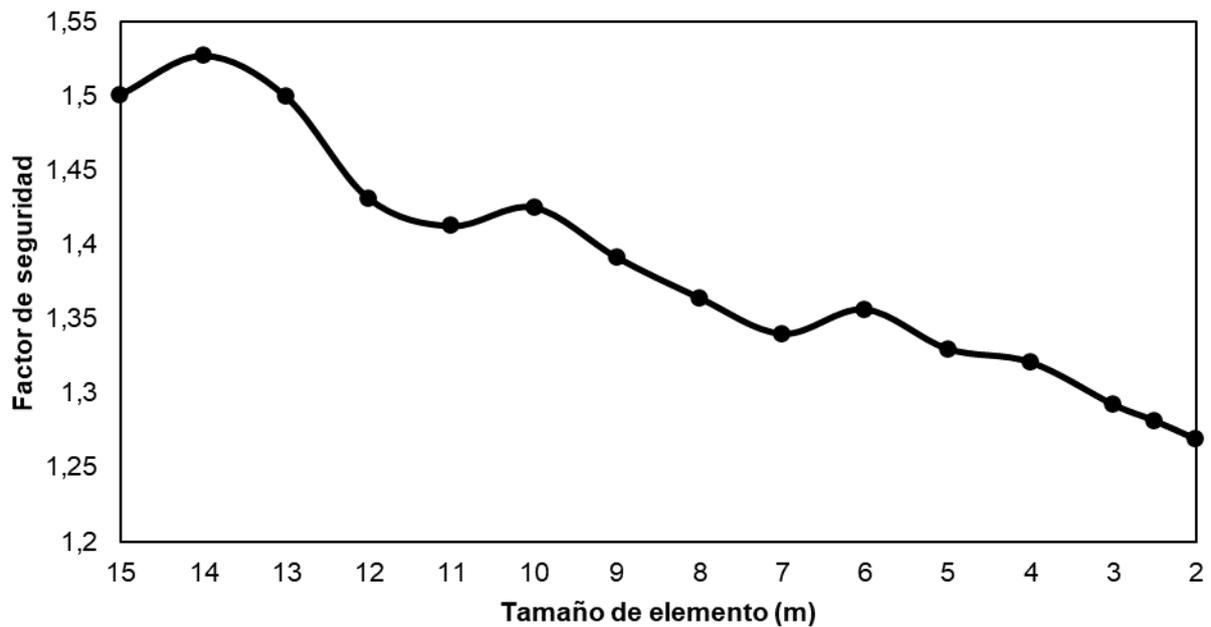


Figura 7. Factores de seguridad de la ladera analizada.

Como se puede apreciar existe una diferencia notable de los resultados obtenidos en las primeras iteraciones (8,7%), y es a partir del tamaño de 5 m donde se logra cierta estabilidad en el modelo, con una diferencia del 4,6% respecto a la última. Por lo tanto, se puede asumir que el factor de seguridad del talud es de aproximadamente 1,27, el cual evidentemente al encontrarse en el rango de 1 y 1,5, implica que la ladera luego de la falla sería estable, pero no segura, por lo que un evento hidrometeorológico como el ocurrido los días cercanos al 21 de abril de 2023 pudiera provocar otro desprendimiento. Esto demuestra la efectividad de las técnicas de percepción remota para identificar zonas de posibles fallos de taludes.

En el estudio realizado se demostró la posibilidad de identificar zonas con riesgo de deslizamientos o desprendimientos mediante técnicas de percepción remota validada a través de un caso de estudio de una ladera natural ya colapsada. Con estas técnicas es posible obtener indicadores de humedad del suelo y el nivel de vegetación para estimar la susceptibilidad de las laderas naturales a las fallas.

El estudio demostró la eficiencia de las técnicas de percepción remota a través de herramientas satelitales para identificar zonas en riesgo de fallas en laderas naturales, que luego pueden ser verificadas a través de herramientas computacionales que calculan el valor exacto del factor de seguridad. Además, con el empleo de programas computacionales, siendo el MIDAS GTS NX el empleado en este caso, se puede evaluar el nivel de estabilidad del mismo, dando como resultado en este estudio un talud estable pero no seguro. Además, este estudio demuestra que, con una menor cantidad de recursos y una metodología más sencilla, es posible obtener resultados satisfactorios, al igual que los obtenidos en otros estudios para evaluar la inestabilidad de taludes como las técnicas de procesamiento de la inteligencia artificial o datos de teledetección con técnicas como la interferometría multitemporal.

Por lo tanto, siguiendo la metodología desarrollada en este trabajo cuando se identifiquen laderas inestables e inseguras, permitiría tomar medidas para prevenir dicho colapso y proteger infraestructuras y vidas.

1. L. R. Ram, L. Maurizio, and O. Tolulope, "Remote Sensing Approaches and Related Techniques to Map and Study Landslides.," 2020. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93681>
2. H. Moayedi, D. Tien Bui, and L. Kok Foong, "Slope Stability Monitoring Using Novel Remote Sensing Based Fuzzy Logic," *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 21, Oct 24 2019.10.3390/s19214636
3. Z. Marta *et al.*, "Multi-Sensor and Multi-Scale Remote Sensing Approach for Assessing Slope Instability along Transportation Corridors Using Satellites and Uncrewed Aircraft Systems," *Remote sensing*, 2023. <https://www.doi.org/10.3390/rs15123016>
4. W. Janusz and B. Fabio, "Remote sensing of landslide motion with emphasis on satellite multi-temporal interferometry applications.," 2021. <https://www.doi.org/10.1016/b978-0-12-818464-6.00006-8>
5. A. Mohan, A. Kumar Singh, B. Kumar, and R. Dwivedi, "Review on remote sensing methods for landslide detection using machine and deep learning," *Trans Emerging Tel Tech.*, 2020. <https://doi.org/10.1002/ett.3998>
6. C. Zhong *et al.*, "Landslide mapping with remote sensing: challenges and opportunities," *International Journal of Remote Sensing*, 2019. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1672904>
7. Z. Xia, M. Motagh, T. Li, and S. Roessner, "The June 2020 Aniangzhai landslide in Sichuan Province, Southwest China: slope instability analysis from radar and optical satellite remote sensing data," 2022. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01777-4>
8. B. Mila, "A multi-source remote sensing technical framework for wide-area landslide detection," 2023. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2080>
9. Q. Xu *et al.*, "3D Rock Structure Digital Characterization Using Airborne LiDAR and Unmanned Aerial Vehicle Techniques for Stability Analysis of a Blocky Rock Mass Slope," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 13, 2022.10.3390/rs14133044
10. M. Mahdi, X. Zhuge, and L. Jerry, "Pre-, co- and post-failure analysis of the Aniangzhai landslide on 17 June 2020 with satellite remote sensing and corner reflector InSAR (CR-InSAR).," 2022. <https://www.doi.org/10.5194/egusphere-egu22-4905>
11. T. Cuscó, "Más de 30 mil habitantes quedan incomunicados por deslizamiento de tierra en Santiago de Cuba," in *Periódico Cubano*, ed, 2023.
12. B. Riedler *et al.*, "Copernicus Knowledge and Innovation Hubs," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLIII-B5-2020, pp. 35-42, 2020. <https://www.doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B5-2020-35-2020>
13. K. Siniša, "Integracija snimaka sa Copernicus satelitskog sustava u web aplikaciju," 2019. <https://typeset.io/papers/integracija-snimaka-sa-copernicus-satelitskog-sustava-u-web-pp5atr1ivh>
14. K. N. Kujakeldiev, Z. Qilichev, and S. S. Faiziev, "Determining the Absolute Height of the Ground Using the Global Mapper Program and Creating the Relief of Eroded Lands on the Basis of an Automated System," *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, vol. 7, no. 7, pp. 102-108, 2020.
15. H. Ahmeti, "Identification of the landslide area on the side slopes on the Suhareke-Prizren Highway by applying the Global Mapper software," *UBT International Conference*, vol. 12, 2023. <https://doi.org/10.33107/ubt-ic.2023.348>
16. S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang, and G. Shao, "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing," *Northeast Forestry University*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
17. T. Deevia Bhaga, T. Dube, M. Davis Shekede, and C. Shoko, "Impacts of Climate Variability and Drought on Surface Water Resources in Sub-Saharan Africa Using Remote Sensing: A Review," *Remote sensing*, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12244184>
18. A. A. Kareem, B. K. Oleiwi, and M. J. Mohamed, "Planning the Optimal 3D Quadcopter Trajectory Using a Delivery System-Based Hybrid Algorithm," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 16, no. 2, 2023. <https://doi.org/10.22266/ijies2023.0430.34>
19. A. A. Kareem, M. J. Mohamed, and B. K. Oleiwi, "Unmanned aerial vehicle path planning in a 3D environment using a hybrid algorithm," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 905-915, 2024. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.6020>
20. P. Fejes and A. Horkai, "Creating City Models in ArchiCAD Software Environment," vol. 10, no. 1, pp. 11-17, 2021. <https://doi.org/10.9790/1813-1001011117>

21. C. Carbonell-Carrera, J. L. Saorin, D. Melián-Díaz, and S. Hess-Medler, "Spatial Orientation Skill Performance with a Workshop Based on Green Infrastructure in Cities," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 9, no. 4, p. 216, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040216>
22. L. Zhang, "A generalized three-dimensional Hoek–Brown strength criterion," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 41, no. 6, pp. 893-915, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00603-008-0169-8>
23. W. Yuan *et al.*, "A rapid stability charts analysis method for rock slopes based on Generalized Hoek-Brown criterion," *All Earth*, vol. 33, no. 1, pp. 98-107, 2021. <https://doi.org/10.1080/27669645.2021.1959282>
24. L. Youn-Kyou and P. S., "Limit Equilibrium Analysis Incorporating the Generalized Hoek–Brown Criterion," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1007/S00603-021-02518-8>
25. Y. Wei, L. Jiaxin, L. Zonghong, W. Wei, and S. Xiaoyun, "A strength reduction method based on the Generalized Hoek-Brown (GHB) criterion for rock slope stability analysis," *Computers and Geotechnics*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103240>
26. C. Sun, J. Chai, Z. Xu, Y. Qin, and X. Chen, "Stability charts for rock mass slopes based on the Hoek-Brown strength reduction technique," *Engineering Geology*, vol. 214, pp. 94-106, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.017>
27. A. Saeidi, C. Cloutier, A. Kamalibandpey, and A. Shahbazi, "Evaluation of the Effect of Geomechanical Parameters and In Situ Stress on Tunnel Response Using Equivalent Mohr-Coulomb and Generalized Hoek-Brown Criteria," *Geosciences*, vol. 12, no. 7, 2022. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070262>
28. K. K. H. Shiyuan, L. Wenhua, C. Hu, F. I., and Z. F. i. E. S. Yuxin, "Sandstone Slope Stability Analysis Under Wetting-Drying Cycles Based on Generalized Hoek-Brown Failure Criterion," vol. 10, 2022. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.838862>
29. K. Ali *et al.*, "Limit analysis for the seismic stability of three-dimensional rock slopes using the generalized Hoek-Brown criterion," *International journal of mining science and technology*, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.IJMST.2021.10.005>
30. W. Fu and Y. Liao, "Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation," *Computers and Geotechnics*, vol. 37, no. 3, pp. 288-298, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.11.002>
31. A. P. Dyson and A. Tolooiyan, "Optimisation of strength reduction finite element method codes for slope stability analysis," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 3, no. 1, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0148-1>