Empleo De Imágenes Satelitales Multiespectrales Para La Identificación De Deslizamientos De Laderas En Carreteras

Use Of Multispectral Satellite Images For Identification Of Road Slope Landslides

Autores

Obdulia Suárez Cisneros[1], Alain Benito Díaz Márquez [2], Dania Olga Abreu Hernández[3]

[1]Ingeniera Civil. Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), obdu2023@gmail.com
[2]Ingeniero Civil. Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae)
[3]Dra. en Ciencias Pedagógicas, Ing. Aerofotogeodesta. Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae). daniah@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Entre las técnicas de percepción remota más utilizadas en la actualidad, se distinguen las imágenes satelitales, por las posibilidades que ofrecen para obtener información de una amplia cobertura de la superficie terrestre detectando los cambios sutiles que ocurren mediante la comparación de datos históricos de una misma zona. Así es posible realizar el monitoreo de fenómenos naturales o de transformaciones realizadas por la actividad humana. Mediante el empleo de imágenes satelitales multiespectrales se realizó el estudio que da lugar al análisis de los deslizamientos de laderas en un tramo de la carretera de "La Farola". Se descargaron desde la plataforma Copernicus las imágenes de la misión Sentinel 2. Mediante herramientas de cálculo del software global mapper se obtuvieron los índices espectrales asociados a los factores condicionantes al deslizamiento de laderas en carreteras. El monitoreo se realizó mediante un procedimiento propuesto en el que, a partir de imágenes tomadas en diferentes fechas, se identificaron zonas de peligro a la ocurrencia de deslizamientos de ladera, contrastando la imagen a color verdadero con los mapas obtenidos mediante la modelación de los índices espectrales. Se procesaron los datos para obtener valores de clasificación de la vegetación y humedad del suelo a partir de los rangos de parametrización de cada índice espectral.

Palabras claves: *deslizamientos de laderas, imágenes satelitales, técnicas de percepción remota.*

ABSTRACT

Among the most widely used remote sensing techniques today, satellite images are distinguished by the possibilities they offer to obtain information from a wide coverage of the earth's surface by detecting the subtle changes that occur by comparing historical data from the same area. This makes it possible to monitor natural phenomena or transformations carried out by human activity. By multispectral satellite images, the study was carried out that gives rise to the analysis of the landslides on a section of the "La Farola" road. The images of the Sentinel 2 mission were downloaded from the Copernicus platform. Using calculation tools of the global mapper software, the spectral indices associated with the conditioning factors for slope sliding on roads were obtained. The monitoring was carried out through a proposed procedure in which, from images taken on different dates, danger zones to the occurrence of slope landslides were identified, contrasting the true color image with the maps obtained by modeling the spectral indices. The data were processed to obtain classification values of vegetation and soil moisture from the parameterization ranges of each spectral index.

Keywords*: slope slides, satellite imagery, remote sensing techniques.*

Nota Editorial: Recibido: Mayo 2024 Aceptado: Julio 2024

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de laderas ocurren en la actualidad con elevada frecuencia en cualquier región de la geografía terrestre. Estos eventos ocasionan daños a la infraestructura vial ya que afectan la superficie de las vías, obstaculizan el paso, interrumpen el transporte, y en muchas ocasiones poner en peligro la vida humana. La necesidad de prevenir estos desastres requiere del empleo eficaz de herramientas de detección temprana; emergiendo como una tecnología innovadora para este fin, el uso de las imágenes multiespectrales [1].

Las imágenes multiespectrales captan información del objeto representado en diferentes bandas del espectro electromagnético, revelando información no visible por el ojo humano; desde el rango infrarrojo al de luz visible. Esta propiedad permite analizar la composición del suelo, la vegetación, la humedad y otros indicadores de inestabilidad que anuncian la posibilidad de un deslizamiento de laderas [2].

En la actualidad, las imágenes multiespectrales están siendo utilizadas a nivel global para la identificación temprana de deslizamientos de laderas. En macizos montañosos como las montañas del Himalaya [3] y la cordillera de Los Andes [4], investigadores están desarrollando métodos y técnicas para crear mapas de riesgo y monitorear zonas vulnerables, empleando imágenes multiespectrales tomadas desde diferentes plataformas de vuelo, ya sea satelital o desde vuelos con drone.

En España, la utilización de imágenes satelitales para el estudio de deslizamientos de laderas se ha intensificado en los últimos años. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) utiliza imágenes multiespectrales y técnicas de análisis espacial para la identificación de áreas con riesgo de deslizamientos, la elaboración de mapas de susceptibilidad y el monitoreo de la evolución de los deslizamientos [5].

La aplicación de imágenes satelitales para la detección de deslizamientos en América Latina ha alcanzado especial significación, por su alta incidencia, teniendo en cuenta la complejidad de la geografía del continente. Se exhiben en esta región cadenas montañosas, con estructuras geológicas diversas y combinación de eventos desencadenantes producidos por intensas lluvias y recurrentes sismos en zonas de inestabilidad tectónica. Países como Brasil, Colombia, Perú y Chile cuentan con programas de monitoreo de deslizamientos basados en imágenes satelitales multiespectrales, que permiten la detección temprana de áreas de riesgo y la toma de medidas para su prevención [6].

En Cuba el empleo de imágenes multiespectrales ha ganado notoriedad para el estudio de diferentes fenómenos. Instituciones líderes en su uso han desarrollado importantes investigaciones referidas al monitoreo de eventos meteorológicos, ocurrencia de sismos, estudio del clima y de otros movimientos que caracterizan la dinámica de la superficie terrestre. En el presente artículo se exponen resultados del empleo de imágenes multiespectrales para la identificación de zonas vulnerables a los deslizamientos de laderas en un tramo de la carretera de La Farola. Para esto se emplea un procedimiento que combina las técnicas para la obtención de las imágenes al uso de software para su procesamiento y análisis.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Breve reseña sobre el uso de imágenes satelitales

Las mayores potencias en el empleo de imágenes satelitales a nivel mundial han sido históricamente Rusia y Estados Unidos. El desarrollo de la carrera espacial desde la década de 1950 hizo que ambos países se destacaran por el desarrollo de tecnologías para el desarrollo estratégico de la infraestructura que sirve de soporte a la obtención de información de la Tierra de forma remota. El Explorer 6, lanzado por Estados Unidos en 1959, capturó la primera imagen satelital de la Tierra. Desde entonces, se han desarrollado programas como Landsat y Sentinel, que actualmente figuran entre los más empleados para monitorear la superficie terrestre y estudiar fenómenos naturales [7].

A los pioneros en el empleo de técnicas para la exploración desde el espacio de la superficie terrestre y otros cuerpos celestes como Marte y La Luna, por citar algunos, se unen nuevas potencias que emergen desde la década del 1970 y que actualmente se posicionan y compiten como los de mayor reconocimiento mundial. La Comunidad Europea con el programa de observación de la Tierra “Copernicus”, realiza el monitoreo y análisis de toda la superficie terrestre, con mayor intencionalidad a la obtención de variables que tributan a los sistemas de alerta temprana; para el beneficio de los países que forman parte de la región. Los satélites “Gaoefen” lanzados por China, pueden obtener datos de observación 3D ópticos de alta resolución y datos de altimetría láser de alta precisión. Además, garantizan exactitud para la mapificación 3D satelital a escala 1/10 000. En la región de las Américas se destacan Brasil, México y Venezuela, con diversidad de satélites en órbita y evidencias de investigaciones que les permiten incorporarse a la avanzada que a nivel internacional se vislumbra en el empleo de tecnologías satelitales para el monitoreo de la superficie de sus territorios [8].

Para el desarrollo tecnológico de las técnicas para el monitoreo de la Tierra desde satélites está vinculados de manera biunívoca las plataformas de vuelo (satélites) que orbitan a más de 700 km de altura, a la amplia gama de sensores que permiten realizar tomas de imágenes de alta resolución. Las cámaras que tradicionalmente obtenían imágenes en color natural actualmente amplían su espectro más allá del rango visible por el ojo humano. Además, aumenta la resolución de la imagen en la medida que se perfecciona la fabricación de las cámaras y sus componentes.

Las imágenes satelitales para la identificación de deslizamientos de laderas en carreteras

La toma de imágenes satelitales constituye en la actualidad una herramienta de gran valor para el monitoreo de los deslizamientos de laderas en carreteras. Su empleo consiste en la identificación de patrones del comportamiento de los factores que se relacionan al deslizamiento, entre los que se pueden mencionar la pendiente, vegetación, textura y humedad del suelo, entre otros.

En dependencia de los sensores que se emplean para la toma de imágenes, estas pueden ser RGB (color natural), multiespectrales o hiperespectrales. Se tiene en cuenta para esta clasificación el rango del espectro electromagnético, y la cantidad de bandas sobre las cuales se obtienen las imágenes. En cuanto a las resoluciones de las imágenes están suelen asociarse fundamentalmente a la resolución espacial, determinada por el tamaño del píxel en el terreno, siendo los valores menores los que mayor resolución ofrecen, es decir las de mayor precisión en la identificación de los detalles representados en la imagen. (Ver figura 1)

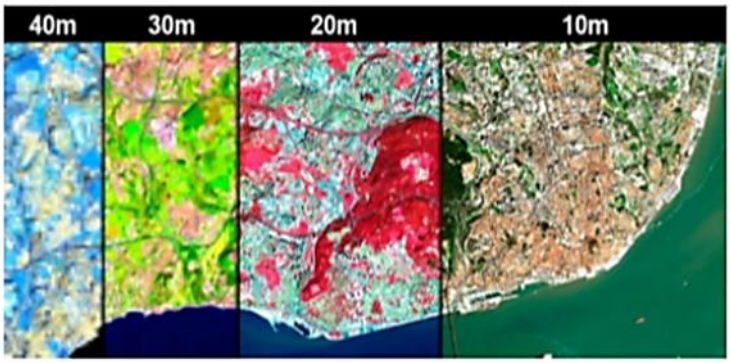

Figura 1: *Imágenes satelitales multiespectrales con diferentes combinaciones de bandas y resoluciones. Fuente: (https://www.gisandbeers.com/pansharpening-mejorando-la-resolucion-de-imagenes-satelite)*

Para el posprocesamiento de las imágenes se emplean software diseñados como sistemas de información geográfica, que permiten obtener con precisión la información georreferenciada, a la vez que la representación del terreno puede ser trabajada por capas en dependencia del contenido y la estructura de los datos. Los más difundidos son ArcMap, ArcGIS Pro, gvSIG, ENVI, Erdas o QGIS, mediante ellos se aplican herramientas para la obtención de modelos derivados, como soporte para el posterior análisis de sus metadatos [9].

Imágenes satelitales multiespectrales, como las proporcionadas por la misión Sentinel-2, son de gran utilidad ya que capturan información en diferentes bandas del espectro electromagnético, lo que permite detectar cambios sutiles en la vegetación, la humedad del suelo y la topografía del terreno, factores condicionantes de la ocurrencia de deslizamientos de laderas. Se asocian al estudio de factores condicionante la combinación de entre 2 y 3 bandas que permiten resaltar los rasgos que distinguen su comportamiento. Las bandas espectrales 11, 8 y 4 son empleadas para el análisis de la vegetación, la humedad del suelo mediante las bandas 3 y 8 y la textura de la superficie terrestre se asocia las bandas 5 y 7. Estas combinaciones se realizan mediante la aplicación de algoritmos matemáticos, programables de forma automática o manual en los softwares diseñados para el procesamiento de las imágenes.

Procedimiento para la identificación de deslizamientos de laderas mediante el empleo de imágenes multiespectrales

La identificación de deslizamientos de laderas es un proceso complejo que debe ser realizado por equipos multidisciplinarios, pues requiere de la experticia de varios especialistas y de la aplicación de técnicas de medición directa e indirecta, así como del procesamiento y modelado de la información recopilada. Un procedimiento general consistiría en el empleo de las imágenes multiespectrales para el análisis en zonas de gran cobertura, aplicando otras técnicas *in situ* para la determinación de factores directamente sobre el terreno, como vía para la validación de los resultados obtenidos mediante técnicas de percepción remota. Se definen como secuencia de trabajo las siguientes actividades:

Inspección visual: Los deslizamientos de laderas a menudo se manifiestan como grietas, hendiduras, deformaciones o cambios en la inclinación del terreno. La inspección visual regular de las carreteras puede ayudar a detectar estos signos temprano. Sobre imágenes generadas en una banda a color natural se pueden identificar de manera visual zonas desprovistas de vegetación, con pendientes pronunciadas. Los cambios pueden ser detectados al comparar imágenes tomadas en fechas que anteceden o posteriores a la ocurrencia de deslizamientos.

Monitoreo geotécnico: El monitoreo geotécnico puede ayudar a detectar cambios en la estabilidad del suelo y la presencia de agua subterránea. Las mediciones geotécnicas pueden incluir inclinómetros, piezómetros, extensómetros y otros dispositivos. Esta técnica ofrece mayor precisión durante la medición, pero resulta más engorrosa y difícil de aplicar en lugares de difícil acceso. Se recomienda para la validación de los resultados obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes satelitales.

Análisis de imágenes satelitales (multiespectrales): Las imágenes multiespectrales pueden proporcionar una vista general de las áreas propensas a los deslizamientos de laderas y ayudar a identificar cambios relacionados con la geomorfología del terreno. El hecho de contar con diferentes bandas del espectro electromagnético permite que sean utilizadas para la generación de modelos de índices espectrales, relacionados a los factores condicionantes de los deslizamientos de laderas. Para validar su precisión se pueden emplear métodos geotécnicos de medición insitu.

Modelado numérico: Del posprocesamiento de las imágenes y obtención de modelos digitales del terreno y modelos derivados como los índices espectrales se obtienen, además, gráficos, histogramas y bases de datos numéricos. Finalmente se generan ecuaciones del comportamiento de los factores condicionantes, estableciendo de forma precisa las relaciones existentes entre los factores condicionantes, ante la ocurrencia de un factor desencadenante, dígase intensas precipitaciones, para el estudio realizado. El modelado numérico puede ayudar a predecir la estabilidad del suelo y la probabilidad de la ocurrencia de deslizamientos de laderas.

Para la mayor precisión en el análisis es necesario obtener datos históricos mediante el procesamiento de imágenes tomadas en diferentes momentos. Se recomienda establecer un rango de tiempo teniendo en cuenta la recurrencia de des deslizamientos en la zona de estudios y períodos relacionados a los factores desencadenantes a los deslizamientos. Para las condiciones de Cuba, se reconoce como el principal factor desencadenante las intensas lluvias y se establecen dos períodos; lluvioso (meses de abril a octubre) y de seca (noviembre a abril).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio de deslizamiento de laderas mediante imágenes satelitales en la carretera de "La Farola"

La carretera de La Farola constituye uno de los viales del país con mayor probabilidad de deslizamiento de laderas, debido a que su trazado atraviesa una región con una topografía compleja, con pendientes abruptas y presencia de materiales de baja resistencia, como las serpentinitas y sus suelos meteorizados. Existen referencias en los reportes de eventos meteorológicos de intensidad ocurridos en los últimos años que así lo validad, la principal causa de la ocurrencia de este fenómeno en Cuba está asociada a las intensas precipitaciones por lo que se ha procedido a la búsqueda de datos históricos que permitan constatar la manera en que se ha deformado la ladera, mediante la comparación de imágenes de la región antes y después del deslizamiento fijado. El estudio se realiza en fechas específicas de septiembre del 2020 y abril del 2021.

Refiere la bibliografía y testimonios de algunos habitantes que desde el 2008 aproximadamente han sido más recurrentes los deslizamientos en la zona. La época lluviosa entre los meses de mayo a octubre es la que ofrece mayor peligro para este fenómeno, teniendo en cuenta que son las intensas precipitaciones el factor desencadenante de mayor incidencia.

Anteceden a la investigación estudios que profundizan en el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos de laderas. Las inspecciones de campo y la información aportada por los habitantes de la zona permiten confirmar que a lo largo del vial el tramo con mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos es el Cajobabo Baracoa, ubicado en las coordenadas 20,209° N y 74,457° W. Existen varios resultados de estudios e investigaciones en la región oriental, provenientes de instituciones especializadas que han obtenido modelos de comportamiento de los factores condicionantes al deslizamiento de laderas, elaborando mapas de susceptibilidad, como se muestra en la figura 2.

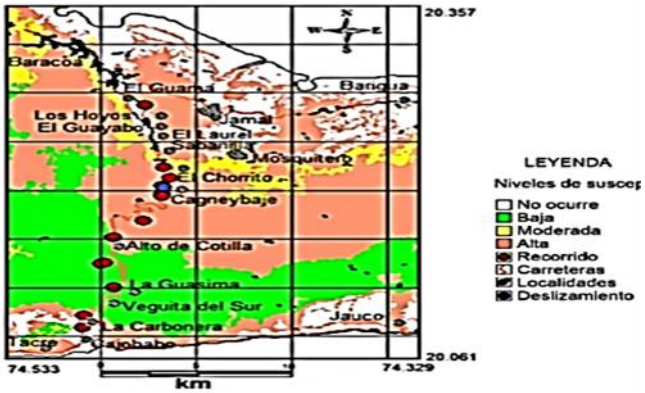

Figura 2: *Mapa de susceptibilidad a deslizamiento de laderas en la región oriental.*[1] [10]

- **Caracterización de la carretera de La Farola**

• **Ubicación geográfica:** Se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas (20,04°-20,36°) de latitud norte y entre los (74,4° -74,5°) de longitud oeste. Limita al norte con el municipio Baracoa, al sur con el Mar Caribe, al este con el poblado El Jauco y al oeste con el municipio Imías, en las provincias Guantánamo y Holguín. (Ver figura 3)

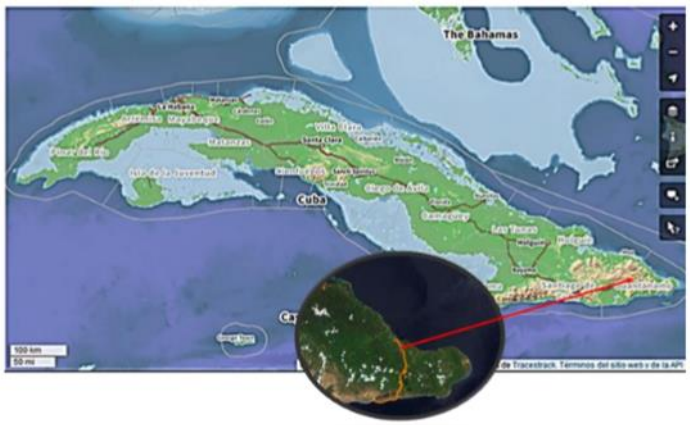

Figura 3: *Ubicación geográfica de la carretera de La Farola*

Se extiende desde el sureste del municipio Imías hasta la ciudad de Baracoa, en la provincia de Guantánamo, Cuba. Ocupa una distancia de 34 kilómetros y se encuentra enclavado en la región montañosa conocida como las Montañas del Noreste, específicamente entre las Cuchillas de Baracoa y la Sierra del Purial.

La topografía de la zona es extremadamente montañosa y abrupta, con una gran variabilidad en altitudes. Se pueden identificar llanuras, y una amplia zona elevaciones que pueden alcanzar hasta los 1000 m de altura SNMM. En el área se encuentran varias elevaciones significativas, como el Alto de Cotilla (570 m), las Cuchillas de Baracoa (460 m), la Loma Salto del Indio (490 m), la Loma de la Farola (700 m), la Loma Juan Ramírez (570 m), entre otras.

La disección vertical, representa la profundidad causada por la erosión producida por corrientes de agua superficiales, esta varía desde (0 - 10 m) hasta disecciones profundas (50 - 75 m). La disección horizontal indica el grado de desmembramiento de la superficie terrestre debido a las corrientes de agua, que va desde suavemente (0 – 3 m) hasta fuertemente diseccionadas (4 - 5 m), que coinciden con los cauces de los afluentes de las corrientes temporales. La zona presenta laderas con diversas inclinaciones, que van desde ligeramente inclinadas (2º - 5º) hasta verticales (55º - 90º), siendo estas últimas principalmente de origen antrópico.

La región cuenta con una densa red fluvial compuesta por ríos y arroyos que drenan sus aguas hacia las vertientes sur y norte, predominantemente en dirección submeridional. Estos ríos presentan valles en forma de U o en V y cuentan con numerosos saltos de agua, con alturas que varían desde 1 - 4 m hasta 20 - 50 m. Algunos de los ríos presentes en la zona incluyen el río Sierra, Jagüeyes, Jobito, Colonia, Pino, Jojo, Yagrumaje, Minas, Viaya, Yarey, entre otros. Estos ríos son vitales para el abastecimiento de agua y, en algunos casos, para la generación de electricidad en la región, especialmente durante la temporada de lluvias.

La vegetación en el área de estudio es típicamente tropical, con densos bosques y matorrales que dificultan el tránsito. Se pueden identificar diversas formaciones vegetales, que incluyen bosques de coníferas, bosques foliáceos, cultivos rotativos, hierbas y pastos artificiales, huertos con árboles frutales y cítricos, así como malezas compactas sin espinas.

El clima en el área de estudio se clasifica como tropical lluvioso, según la clasificación de Köppen. Las lluvias están distribuidas estacionalmente, con más del 65% del acumulado anual durante el período lluvioso, que abarca de mayo a octubre, y un período seco que va de noviembre a abril.

Las temperaturas en la región son elevadas durante todo el año, con los meses más cálidos siendo julio y agosto, con temperaturas medias de 27,8°C y 27,6°C, respectivamente. Los meses más frescos son febrero y enero, con temperaturas medias de 23,7°C y 24,0°C. La temperatura media anual es de 25,8°C.

Las altas temperaturas en la región contribuyen a una alta tasa de evaporación y evapotranspiración, lo que, junto con la escasa precipitación en algunos meses, puede generar condiciones de sequía en la zona. La precipitación media anual es de alrededor de los 2500 a 2700 mm.

La carretera consta de 11 tramos principales, que se extienden entre los pilares y que tienen una longitud promedio de 330 m. El tramo principal del viaducto, conocido como el “Puente La Farola”, tiene una longitud de 456 m y 6 m de ancho. Se ubica a y una altura de 110 m sobre el nivel del mar.

Como solución ingenieril se logró que en los tramos donde el terraplén no alcanzaba las dimensiones de proyecto, se construyó el puente levadizo en realizar el corte de la loma. Se levantan sobre el precipicio vigas y pilotes de hormigón prefabricados, elementos por primera vez utilizados en Cuba en una obra de tal magnitud. De esta manera se evitó el empleo de explosivos para rebajar las trocas del tipo serpentinita, lo que hubiese atentado contra la estabilidad del terreno y por consecuencia los deslizamientos serías mucho más frecuentes.

Su construcción se caracteriza además por la fabricación de vigas T de nueve metros de longitud, colocadas perpendicularmente al eje de la vía, a una distancia de tres metros y medio, fundidas en dos secciones por la estrechez del camino, para que los camiones pudieran salvar las curvas. El viaducto es el más importante y directo enlace terrestre con que cuenta la primera villa fundada en Cuba, Baracoa, el municipio cubano más montañoso, con la capital de la provincia más oriental de la isla, Guantánamo.

Análisis de deslizamientos mediante imágenes satelitales del viaducto

Siguiendo el procedimiento propuesto se obtuvieron imágenes de la zona del viaducto siguiendo como criterio para el análisis multitemporal la selección de fechas próximas a la ocurrencia de un deslizamiento de laderas. Siguiendo como referente los inventarios sobre la ocurrencia de deslizamiento de laderas en el viaducto en fecha próxima a los días (4 - 7) de julio del 2021 se descargaron imágenes que anteceden y preceden a la ocurrencia del deslizamiento. Una vez obtenidas las imágenes son utilizadas las que contengan menor cantidad de nubes que dificulten la visibilidad en la zona donde se ubica la carretera. La descarga en Copernicus permite no solo obtener cada una de las bandas del Sentinel, sino también se visualizan las combinaciones de bandas. Esta variante para la obtención de imágenes es muy útil para realizar análisis visual de las imágenes, el software Copernicus realiza el procesamiento de forma automática y siempre que a simple vista se puedan observar cambios.

Para realizar el análisis multitemporal se toma los resultados de los modelos de índices espectrales en diferentes épocas, teniendo como resultados que se muestran pequeños cambios superficiales, pero que depende en gran medida el análisis que se realice de la resolución de las imágenes y de la calidad de estas por el porcentaje de terreno que queda libre nubosidad. Si bien estas herramientas permiten evaluar la superficie del terreno, el estudio detallado que permita identificar deslizamientos de laderas, requiere del empleo de las herramientas para el análisis automatizado. La descarga se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Para la descarga de imágenes en Copernicus se marcó sobre el mapa la franja que contiene al viaducto de La Farola en un área de aproximadamente de 1000 km², en dirección norte sur.
- Se fijaron fechas para la obtención de las imágenes con la intencionalidad de que estuvieran con bajos niveles de nubosidad en la zona del viaducto La Farola.
- Se estudió en inventarios y otras referencias bibliográficas, los tramos de mayor susceptibilidad, en este caso se reconoce el tramo Cajobabo al mirador ubicado en el Alto de Cotilla.
- Se realizó la búsqueda en fechas previas y posteriores a la ocurrencia del deslizamiento, de todas las imágenes seleccionadas se estudian de manera experimental las que corresponde a los días: 28 de septiembre del 2020 y 16 de abril del 2021.
- Se seleccionaron las imágenes de menor nubosidad y mayor nitidez

Para el procesamiento de las imágenes se utilizaron las herramientas de análisis del programa global mapper con las que se obtuvieron modelos representativos de la vegetación y la humedad del suelo para cada fecha en el tramo seleccionado.

El análisis visual realizado mediante las imágenes a color verdadero (*TCI*) permitió evaluar el comportamiento de algunos factores. En la imagen del mes de abril se aprecian suelos descubiertos hacia el sur oeste, lo cual no se puede identificar en el mes de septiembre del 2020 debido a la nubosidad, existen escasos puntos poblados y en la franja de la carretera no se aprecia otra vía de comunicación de interés. Comparando ambas imágenes se delimitaron dos zonas con rasgos que denotan cambios y movimientos que dan indicios de posibles deslizamientos. (Ver figura 4)

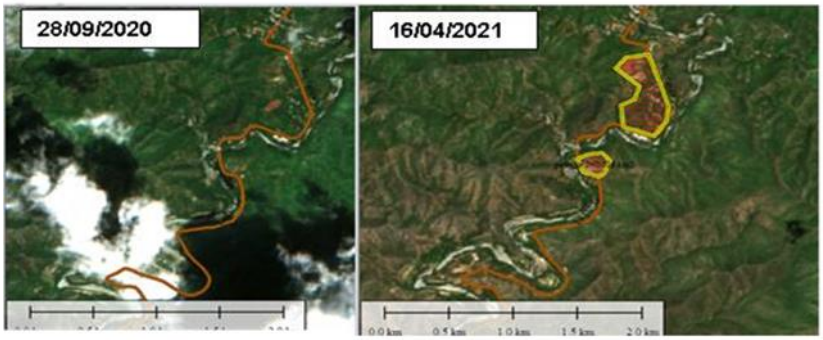

Figura 4: *Zonas de peligro a deslizamientos de laderas. Imagen TCI del Sentinel 2*

La zona de peligro 1 abarca un área de 0,18 km² y cubre un tramo de 799,6 m a lo largo de la carretera, la zona 2 con un área de 0,036 km² y cubre un tramo de 237,21 m. Una vez identificadas ambas zonas se procedió a la obtención de los modelos de índices espectrales. Se realizó el análisis de la vegetación y la humedad mediante el modelo de vegetación (NDVI) (Ver figura 5) y humedad del suelo (NDWI). Ambos modelos fueron generados a partir de herramienta del software global mapper. Se generaron bases de datos y gráficos con información cuantitativa de los valores asumidos para cada zona de peligro. Para el muestreo se tomaron aleatoriamente 10 puntos en cada zona y se obtuvo la clasificación en dependencia de la parametrización realizada para cada caso.

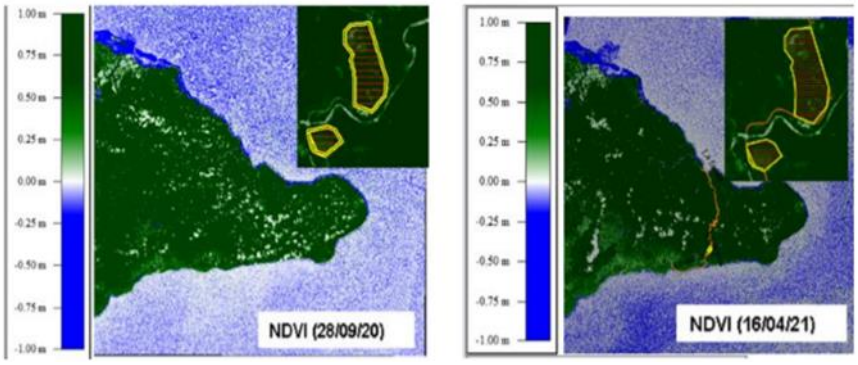

Figura 5: *Modelos de NDVI para cada fecha. Procesamiento en software global mapper*

En la tabla 1 se muestran los valores de NDVI para cada punto en los dos modelos obtenidos. El valor promedio sirvió paras la clasificación de la vegetación, teniendo en cuenta los rangos siguientes.

- (-1 a 0) muy baja
- (0 a 0,2) baja
- (0,2 a 0,5) media
- (0,5 a 1) alta

Tabla 1: *Índice de vegetación (NDVI)*

Puntos	Zona de peligro 1		Zona de peligro 2	
	NDVI (28/09/2020)	NDVI (16/04/2021)	NDVI (28/09/2020)	NDVI (16/04/2021)
1	0,892354	0,807563	0,499601	0,465092
2	0,53398	0,76658	0,902135	0,355593
3	0,823586	0,665735	0,813592	0,470733
4	0,821063	0,596491	0,855344	0,332263
5	0,788698	0,70608	0,855344	0,442406
6	0,770555	0,43829	0,835504	0,20313
7	0,828473	0,337249	0,842833	0,329721
8	0,831268	0,221434	0,740246	0,275299
9	0,857842	0,288026	0,841302	0,334401
10	0,847518	0,322917	0,85175	0,342515
Promedio	**0,7984755**	**0,5150365**	**0,803442**	**0,3651153**

Los gráficos de la figura 6 representan la relación entre los índices de cada zona de peligro, para las dos fechas consultadas.

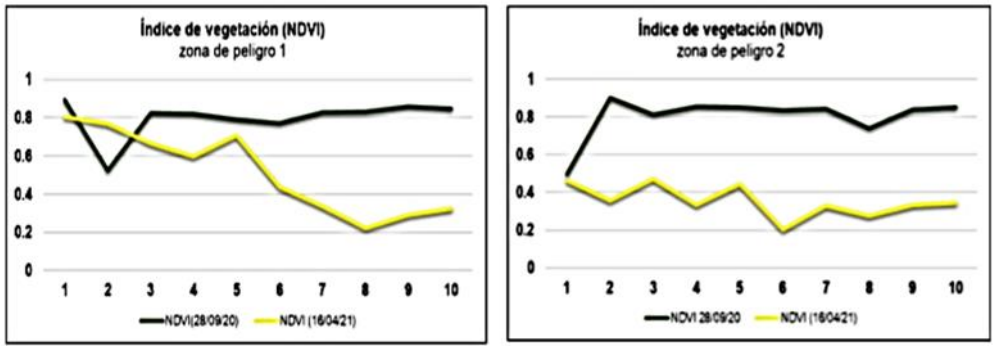

Figura 6: *Representación gráfica del comportamiento de NDVI para cada fecha.*

Los valores de los puntos medidos y el promedio de las mediciones permitieron comprobar que la vegetación en ambas fechas clasifica como alta. Aunque se aprecia una pequeña disminución en la zona de peligro 1. En la zona 2 la disminución de la vegetación es mayor, transitando de muy alta a valores que se aproximan al rango medio.

Similar procesamiento se aplicó para obtener el NDWI, los valores se muestran en la tabla 2. Para la clasificación del índice de humedad se estimaron los siguientes rangos:

• (-1 a -0,5): terrenos secos, vegetación alta
• (-0,5 a 0): vegetación media, suelos desnudos
• (0 a 0,5): suelo desnudo, vegetación baja
• (0,5 a 1): cuerpos de agua

Tabla 2: *Índice de humedad (NDWI)*

Puntos	Zona de peligro 1		Zona de peligro 2	
	NDVI (28/09/2020)	NDVI (16/04/2021)	NDVI (28/09/2020)	NDVI (16/04/2021)
1	-0,769732	-0,673111	-0,648187	-0,544828
2	-0,775148	-0,632118	-0,649756	-0,608952
3	-0,689515	-0,706821	-0,678921	-0,504646
4	-0,751406	-0,706869	-0,724562	-0,658668
5	-0,634188	-0,687895	-0,734529	-0,499352
6	-0,743846	-0,662887	-0,609734	-0,532981
7	-0,726744	-0,582106	-0,616905	-0,532981
8	-0,716398	-0,646036	-0,726593	-0,587082
9	-0,747765	-0,596896	-0,770117	-0,529319
10	-0,709761	-0,616628	-0,765339	-0,622093
Promedio	**-0,7264503**	**-0,6511415**	**-0,6924643**	**-0,559751**

El gráfico de la figura 7 muestra el comportamiento de la humedad del suelo para ambas zonas de peligro.

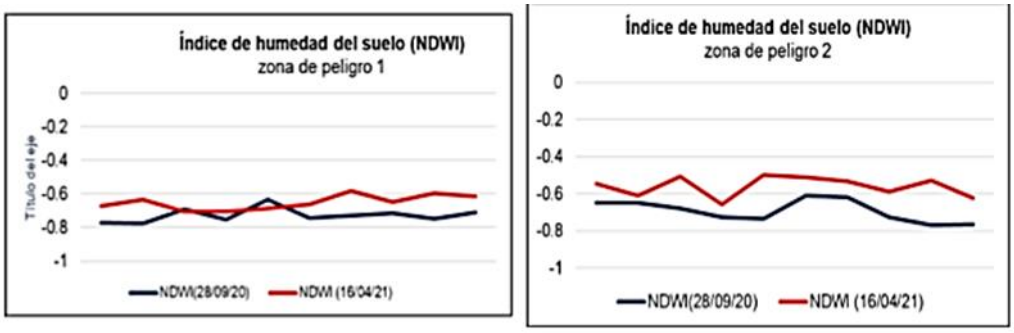

Figura 7: *Representación gráfica del comportamiento de NDWI para cada fecha.*

El comportamiento de la humedad del suelo muestra en ambos casos el terreno seco. Además, clasifica como vegetación alta, lo cual puede ser contrastado con la información brindada por el NDVI. Se aprecia una pequeña disminución de los valores promedios; lo cual puede ser interpretado como influencia de alguna fuente que redujo la condición de sequía, se estima que alguna precipitación ocurrida en días próximos a la fecha de abril del 2021.

El estudio realizado es incipiente, ya que los resultados iniciales obtenidos en la investigación no son concluyentes para la identificación de deslizamientos de laderas, pero permiten dar validez al procedimiento propuesto. La modelación gráfica y matemática realizadas, ha dado lugar a los valores significativos en cuanto a las relaciones numéricas entre la vegetación y la humedad del suelo para ambas zonas de peligro.

Un aspecto esencial del proceso de obtención de las imágenes es la resolución con la que se cuenta. Las imágenes Sentinel son obtenidas con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m, por lo que entre sus limitaciones está la exactitud con la que se pueden detectar algunos elementos del terreno, unido al efecto de la nubosidad que reduce la cobertura real de la imagen del terreno (Ver figura 8). Por estas razones se enfatiza en la necesidad de contrastar la información con otras fuentes, ya sean inventarios o mediciones *in situ*.

Figura 8: *Limitaciones para la interpretación de imágenes satelitales Sentinel 2 del viaducto La Farola a) Resolución espacial b) nubosidad c) altitud del satélite*

4. CONCLUSIONES

Se elaboró un procedimiento para la identificación de deslizamientos de laderas en carreteras, mediante el empleo de imágenes multiespectrales. Desde la plataforma Copernicus se realizó la descarga gratuita de imágenes procedentes de la misión Sentinel 2, nivel L2A. Se procesaron las imágenes mediante el software global mapper, para obtener modelos que representan a los factores condicionantes a los deslizamientos de laderas, específicamente la vegetación mediante el NDVI y la humedad con el NDWI.

Para la aplicación del procedimiento se escogió la carretera de La Farola, tomando como referencia inventarios y mapas de susceptibilidad que ubican a este vial como uno de los de mayor recurrencia de deslizamientos de laderas en Cuba. La modelación realizada permitió identificar dos zonas de peligro a deslizamientos de laderas mediante las imágenes a color natural (TCI), donde se aprecia de manera visual suelo desnudo y desprovisto de vegetación. Los promedios de los valores obtenidos en un grupo de puntos ubicados aleatoriamente en ambas zonas permitieron comprobar que la vegetación se mantiene alta en un período comprendido entre septiembre del 2020 y abril del 2021, con ligera tendencia al decrecimiento. El suelo de las dos zonas clasifica como seco. Aunque en la fecha de abril 2021 en la zona 2 existe una tendencia a reducir condiciones de sequía.

Los resultados no son concluyentes debido a la necesidad de contar con mayor cantidad de datos históricos. Los estudios iniciales permitieron comprobar que mediante el procedimiento propuesto se pueden obtener con precisión valores que permiten clasificar los factores condicionantes a los deslizamientos de laderas. Faltará contrastar con otros modelos e índices relacionados con el resto de los factores condicionantes específicamente con la geomorfología del terreno y con el diseño de la vía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, J., & Arias, J. A. (2023). Deslizamientos de laderas: un problema global que requiere soluciones integrales. Revista de Ingeniería Geológica, 25(1), 1-15.
2. González, R., & Woods, R. E. (2018). Digital image processing. Pearson Education.
3. Mondal S. & Maity S. (2013) Landslide susceptibility mapping at rishikesh-Devprayag road section along NH-58, Uttarakhand, Himalaya using remote sensing and GIS. Journal of Earth System Science.122(4).1123-1142.
4. Suárez, J. & medina, V. y Vargas J. (2010). Landslide susceptibility assessment based on aerial photographs and satellite images using a GIS matrix method: application in the Rio Blanco basin, Ecuadorian Andes. Geomorphology 115(1-2), 43-55.
5. Instituto Geológico y Minero IGME (2022). Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de ladera para la región de Asturias. España.
6. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). Sistema de alerta temprana de deslizamientos basado en imágenes de satélite para la región andina. Bogotá, Colombia
7. Glinsky, V. & Baranowsky, Z. (2015) Commercial Observation Satellites: Making a business of national security. Editorial Carnegie endowment for international pace.
8. Aerospace Studies Institute. China´s Space Activities (2022), (httpss://crsreports congress.gov/).
9. García, A., & Martínez, R. (2022). Introducción a QGIS: Herramientas para el análisis espacial. Editorial Universitaria.
10. Rosabal, D. S. & Oliva, R. Á. (2018) “Susceptibilidad por deslizamientos en el sector Baracoa-Cajobabo. Vol. 38, No. 2. págs. 341–355. Cuba https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos18-2/Rosabal-38-2.