

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-02-08

Artículos

Análisis de la variación espacio-temporal de los cuerpos de agua superficiales en el sector noroeste de la región Central de Cuba correspondiente a las escenas Landsat 14-44 y 14-45

Analysis of the spatio-temporal variation of surface water bodies in the northwest sector of the Central region of Cuba corresponding to Landsat scenes 14-44 and 14-45

Daily González¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3416-6634>

Héctor M. Fernández², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0096-2894>

Marina B. Vega³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6745-5382>

¹Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, dailygonhen@civil.cujae.edu.cu, dailygh00@gmail.com

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, hector@civil.cujae.edu.cu, dr.hectorfer@gmail.com

³Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, mvega@civil.cujae.edu.cu, bvega4442@gmail.com

Autora para correspondencia: Daily González,
dailygonhen@civil.cujae.edu.cu, dailygh00@gmail.com



Resumen

El presente trabajo plantea como objetivo general analizar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en el sector noroeste de la región Central de Cuba correspondiente a las escenas Landsat 14-44 y 14-45. La metodología realizada consistió en crear una base de datos con las imágenes de Landsat 5, 7 y 8 que abarque los quinquenios 2000-2004, 2005-2009 y 2010-2014. El procesamiento de las imágenes se efectuó en el programa *QGIS*, en el cual se confeccionaron combinaciones con diferentes bandas espectrales utilizadas en la identificación del agua y la humedad; se calcularon los índices espectrales (MNDWI y AWEIsh), y se hizo la clasificación supervisada a partir de la aplicación informática *MultiSpecW64* para la posterior extracción de los cuerpos de agua superficiales. Se complementa la información con la cartografía preliminar realizada y el modelo digital de elevaciones. Como resultados, el índice espectral MNDWI y la clasificación supervisada demostraron ser herramientas efectivas para delimitar con precisión los cuerpos de agua superficiales y a partir del procedimiento señalado en el indicador 6.6.1 se obtuvo la variación espacio-temporal de los cuerpos de agua superficiales presentes en cada quinquenio establecido respecto a la línea base, donde el primero (2005-2009) indicó un aumento de 1.40 % y el segundo (2010-2014) presentó una tendencia decreciente de 4.55 %.

Palabras clave: agua superficial, teledetección, vigilancia ambiental, sistema de información geográfica, análisis de datos, política ambiental, Cuba.

Abstract

The present work aims to analyze the spatio-temporal variation of water-related ecosystems in the northwest sector of the Central region of Cuba corresponding to the Landsat 14-44 and 14-45 scenes. The methodology used consisted of creating a database with Landsat 5, 7 and 8 images covering the five-year periods 2000-2004, 2005-2009 and 2010-2014. The images were processed using the *QGIS* program, in which combinations were made with different spectral bands used in the identification of water and humidity; the spectral indices (MNDWI and AWEIsh) were calculated, and the supervised classification was performed, using the *MultiSpecW64* computer application for the subsequent extraction of surface water bodies. The information is complemented with the preliminary cartography carried out and the digital elevation model. As a result, the MNDWI spectral index and supervised classification proved to be effective tools to accurately delimit surface water bodies and from the procedure indicated in indicator 6.6.1, the spatio-temporal variation of the surface water bodies present in each five-year period established with respect to the baseline was obtained, where the first (2005-2009) indicated an increase of 1.40 % and the second (2010-2014) showed a decreasing trend of 4.55 %.

Keywords: Surface water, remote sensing, environmental monitoring, geographic information systems, data analysis, environmental policy, Cuba.

Recibido: 17/06/2024

Aceptado: 14/06/2025

Publicado *ahead of print*: 22/07/2025

Versión final: 01/03/2026

Introducción

Los ecosistemas relacionados con el agua poseen un enorme valor biológico, social, educativo y económico. Además de sostener los ciclos del agua, el carbono y los nutrientes de todo el planeta, proporcionan agua dulce natural purificada, y regulan los flujos y las condiciones extremas. Los bienes y servicios derivados de estos ecosistemas abarcan todo el espectro del desarrollo sostenible y además de suministrar agua potable sustentan las actividades de diversos sectores, como la agricultura, generación de energía, navegación, esparcimiento y turismo (ONU-Agua, 2019).

Los cuerpos de agua superficiales, como ríos, lagos, lagunas y océanos, experimentan variaciones espaciales y temporales en su tamaño, forma, profundidad y calidad del agua. Tales variaciones serán naturales o provocadas por actividades humanas. La importancia de monitorearlas está dada por la influencia que tienen en el sustento de múltiples actividades económicas y sociales.

Las variaciones espaciales se refieren a los cambios en la extensión y la forma de los cuerpos de agua. Un río cambia su curso debido a la erosión o la sedimentación; por otra parte, un lago puede disminuir su tamaño debido a la sequía o al uso excesivo del agua. La variación

espacial también es el resultado de la construcción de represas o canales, que altera el flujo de agua y la forma de los cuerpos de agua.

Las variaciones temporales representan los cambios en el volumen y la calidad del agua de estos cuerpos a lo largo del tiempo. En el caso de los ríos, experimentan variaciones estacionales en su caudal y calidad del agua debido a las lluvias y la temperatura; mientras que los lagos experimentan cambios en su nivel de agua por la evaporación y la entrada de agua de lluvia o ríos. Las variaciones temporales también son el resultado del cambio climático y la gestión inadecuada del agua.

Es importante tener en cuenta que las variaciones espacio-temporales de los cuerpos de agua generan impactos significativos en el medio ambiente y en las comunidades que dependen de ellos debido a que la disminución del tamaño de un lago reduce la disponibilidad de agua para la agricultura y el consumo humano, mientras que la contaminación del agua afecta la salud humana y la vida acuática.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible se compone de 17 objetivos y 169 metas. Para su seguimiento, se diseñaron 232 indicadores que se miden a través de los datos estadísticos que se recogen por las instituciones autorizadas en cada país (INE, 2021).

El objetivo 6 se centra en garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, por lo que establece como meta 6.6 la protección y el restablecimiento de los ecosistemas relacionados con el agua (ONU, 2023). El indicador 6.6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) es descrito como el cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo. Tiene por objeto reunir y suministrar datos sobre la extensión de los ecosistemas asociados con el agua, y la cantidad y calidad del agua que

contienen, en apoyo a todos los procesos de adopción de decisiones (ONU-Agua, 2020).

Dichos ecosistemas han sido estudiados a nivel mundial a partir de diversos métodos (hidrológicos, hidráulicos y de tipo holístico) y técnicas estadísticas; destacan las investigaciones de Qadir, Malik y Husain (2008); Mesa (2009), y Chen *et al.* (2018).

La teledetección —técnica empleada en el estudio de los ecosistemas relacionados con el agua— es necesaria y efectiva debido a su capacidad para detectar desde el espacio los cuerpos de agua, lo que hace más económico y sencillo el control de los mismos. Además, resulta muy útil para visualizar zonas de difícil acceso y cubrir extensiones de terreno más amplias. La aplicación de la misma se ha evidenciado en numerosas investigaciones internacionales, como en los trabajos de Sharma, Singh, Singh y Kalla (1989); Ferrer, Ruíz, Dimas y Estrela (1998); Pérez y García (2006); Magdaleno y Martínez (2006); y Alsdorf, Rodríguez y Lettenmaier (2007). Sin embargo, en Cuba, el empleo de la teledetección para estudiar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua ha sido poco frecuente.

En 2022 se iniciaron en Cuba los primeros estudios de variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua con la aplicación de la teledetección y la minería de datos. Entre los autores que realizaron esta investigación se encuentra Guerra (2022), que calculó los índices AWEI y MNDWI, y efectuó una clasificación no supervisada (K_medias); diseñó un nuevo complemento (*plugin*) para QGIS con el fin de determinar la extensión de aguas superficiales y realizar análisis temporales a partir de imágenes satelitales, donde se emplearon imágenes Landsat para luego comparar los resultados obtenidos con una imagen Sentinel. A partir de imágenes Landsat se determinaron los

índices de vegetación de diferenciación normalizada (NDVI), el índice diferencial de agua normalizada (NDWI) y el índice de diferencia normalizada de humedad (NDMI), con los que se hizo la clasificación no supervisada y supervisada, y se señala que para la cartografía de los ecosistemas relacionados con agua se utilizó la clasificación no supervisada (González, 2022).

Se conocen investigaciones que abarcan algunos sectores dentro de la zona de interés, como la de Hernández (2022), a partir de la aplicación de la teledetección y técnicas de minería de datos. El trabajo con las imágenes satelitales de Landsat 7 ETM y Landsat 8 OLI permitieron el cálculo de los índices NDVI, NDWI y NDMI. Los cuerpos de agua y la humedad se identificaron a través de imágenes de falso color y de índices como NIR-R-G, NIR-SWIR 1-R, SWIR 1-NDVI-NDWI; además, se realizaron clasificaciones supervisada y no supervisada. En el programa WEKA se empleó el clasificador J48 a partir de los valores de reflectancia de las imágenes satelitales. Se obtuvo la cartografía de estos cuerpos y los cambios que se producen en los mismos.

No se conoce la existencia de trabajos previos que realicen el estudio de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua a partir de la aplicación de las técnicas de teledetección y minería de datos que abarque en su totalidad la zona de estudio, lo que imposibilita el control real de la disposición de estos ecosistemas y dificulta la respuesta al indicador 6.6.1 de Cuba dentro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

La hipótesis a partir de la cual se desarrolló el presente trabajo consistió en que el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales existentes y la aplicación de técnicas de minería de datos permitirá determinar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados

con el agua en el sector noroeste de la región Central de Cuba correspondiente a las escenas Landsat 14-44 y 14-45.

Por lo anterior se plantea como objetivo general de la investigación analizar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en el sector noroeste de la región Central de Cuba correspondiente a las escenas Landsat 14-44 y 14-45.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Determinar las herramientas efectivas en la delimitación de los cuerpos de agua superficiales.
2. Valorar el crecimiento o decrecimiento de los ecosistemas relacionados con el agua en los quinquenios 2005-2009 y 2010-2014.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la región Central, y ocupa gran parte de los territorios de las provincias de Villa Clara, Cienfuegos y Sancti Spíritus (Figura 1). Representa el 17.7 % de la superficie total del territorio nacional. Limita al norte con el océano Atlántico, al sur con el mar Caribe, al este con la provincia Ciego de Ávila y al oeste con la provincia Matanzas.

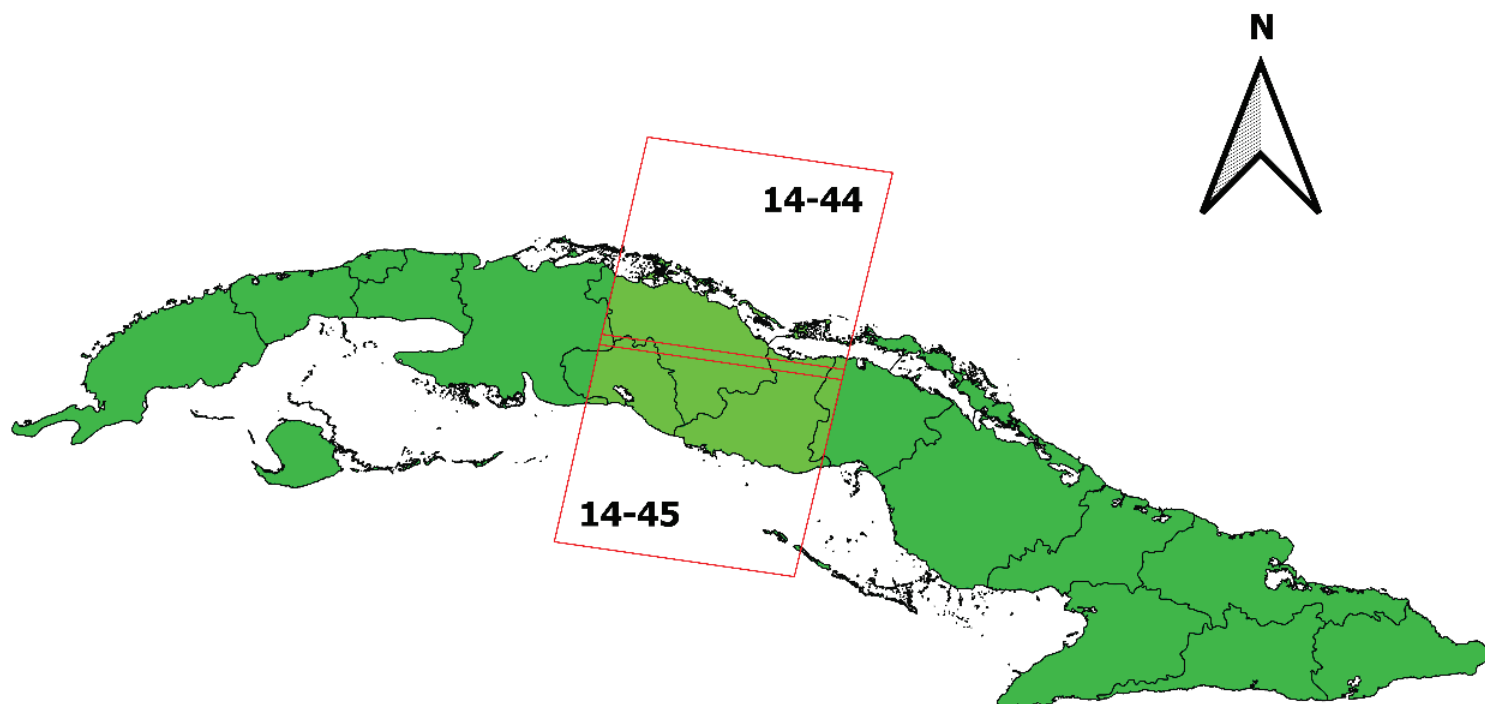


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

El relieve se distingue por su diversidad en gran parte del territorio, debido a la presencia de llanuras, alturas y montañas. Entre ellas se encuentran las alturas del norte de Cuba Central, la llanura del norte de Cuba Central, llanura de Manacas, alturas de Santa Clara (Sierra Alta de Agabama, Sierra del Escambray, Sierra de Mabujina) y Macizo de Guamuhaya.

La provincia de Villa Clara se caracteriza por la presencia de una amplia red fluvial en la que se destacan los principales ríos de la vertiente norte, como Sagua la Grande, con 163 km de longitud, y Sagua la Chica, con 91 km. Los ríos más importantes de Cienfuegos son Arimao, con 82.6 km, y Caunao, con 53.9 km, ambos de la vertiente sur (ONEI, 2022). Sancti Spíritus es la provincia con mayor capacidad de embalse de Cuba.

Existen en el territorio gran cantidad de ríos y arroyos de poca extensión y caudal que se distribuyen en ambas vertientes, especialmente en la sur. Entre los que desembocan en la vertiente sur se destacan los ríos Zaza, Agabama, Jatibonico del Sur e Higuanojo; en la vertiente norte, el río Jatibonico del Norte. El río Zaza es el segundo de mayor extensión, con una longitud de 155 km, que atraviesa diferentes municipios para desembocar en la presa Zaza, que es el mayor lago artificial de agua dulce (Escambray, 2023).

La región investigada está caracterizada por los componentes del substrato plegado: margen continental de Bahamas, arco volcánico cretácico (AVC), terreno Escambray y la asociación ofiolítica, y además la cobertura neoplatafórmica.

Materiales

Las imágenes Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM) y Landsat 8 (OLI-TIRS) fueron descargadas del sitio *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), correspondiente al Servicio Geológico de EUA (USGS, por sus siglas en inglés). Las imágenes presentan una resolución espacial de 30 x 30 m y se encuentran en formato .TIF. En la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 aparecen las bandas de las imágenes multiespectrales con sus correspondientes longitudes de onda.

Tabla 1. Bandas espectrales Landsat 5.

Landsat 5		
Bandas	Rango espectral (micrómetros)	Resolución espacial (metros)
Banda 1- azul	0.45-0.52	30
Banda 2- verde	0.52-0.60	30
Banda 3- rojo	0.63-0.69	30
Banda 4- infrarrojo cercano (NIR)	0.76-0.90	30
Banda 5- infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.55-1.75	30
Banda 6- térmico	10.40-12.50	120* (30)
Banda 7- infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.08-2.35	30

Fuente: Jiménez (2016).

Tabla 2. Bandas espectrales Landsat 7.

Landsat 7		
Bandas	Rango espectral (micrómetros)	Resolución espacial (metros)
Banda 1- azul	0.441-0.514	30
Banda 2- verde	0.519-0.601	30
Banda 3- rojo	0.631-0.692	30
Banda 4- infrarrojo cercano (NIR)	0.772-0.898	30
Banda 5- infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.547-1.749	30
Banda 6- infrarrojo térmico (TIR)	10.31-12.36	60
Banda 7- infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.064-2.345	30
Banda 8- pancromática	0.515-0.896	15

Fuente: Passucci, Carmona y Rivas (2017).

Tabla 3. Bandas espectrales Landsat 8.

Landsat 8		
Bandas	Rango espectral (micrómetros)	Resolución espacial (metros)
Banda 1- aerosol costero	0.43-0.45	30
Banda 2- azul	0.45-0.51	30
Banda 3- verde	0.53-0.59	30
Banda 4- rojo	0.64-0.67	30
Banda 5- infrarrojo cercano (NIR)	0.85-0.88	30
Banda 6- infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.57-1.65	30
Banda 7- infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.11-2.29	30
Banda 8- pancromática	0.50-0.68	15
Banda 9- cirro	1.36-1.38	30
Banda 10- infrarrojo térmico 1 (TIRS 1)	10.60-11.19	100
Banda 11- infrarrojo térmico 2 (TIRS 2)	11.50-12.51	100

Fuente: Jiménez (2016).

Se confeccionó una base de datos con las imágenes disponibles desde el año 2000 al 2021, correspondientes a las escenas 14-44 y 14-45 que conforman el área de estudio, adquiridas en septiembre de 2022. De estas se trabajó el quinquenio 2000-2004 (35 imágenes) establecido como línea base (LB), y los posteriores 2005-2009 (28 imágenes) y 2010-2014 (29 imágenes). El criterio de selección de las mismas se basó en el comportamiento de la nubosidad, es decir, que la nubosidad permitiera la visualización de la gran mayoría de los cuerpos presentes en el área.

Estas pertenecen a la Colección 2, Nivel 2 (C2L2), que tiene como objetivo eliminar el efecto producido por la atmósfera y simplificar el procesamiento de las imágenes, pues las imágenes están dadas en reflectancia de la superficie.

La base geológica de la investigación se tomó del mapa geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000 (IGP, 2011). La disposición de los cuerpos de agua registrados a nivel nacional se obtuvo de un mapa hidrogeológico digital vectorial en formato *shapefile* (Geocuba, 2002). El modelo digital de elevaciones (MDE) utilizado tiene una resolución espacial de 25 x 25 m (Geocuba, 2015).

Identificación de los cuerpos de agua en *SASPlanet*

Las escenas correspondientes fueron cargadas en el *SASPlanet*, herramienta gratuita para la visualización y descarga de imágenes de satélites en alta resolución (Morales, 2022), en la que se utilizó el servidor Bing fundamentalmente para delimitar todos los cuerpos de agua lo más detallado posible a través de la opción Agregar Polígono. Se cargó el mapa vectorial para comparar su localización con los cuerpos de agua generados, lo que permitió corregir la base de datos con identificadores (ID). Los cuerpos de agua identificados se guardaron en formato .kml y luego en formato shp.

Metodología de trabajo

El procedimiento que se debe realizar para el estudio de la variación espacio-temporal de estos ecosistemas, según la Organización de las Naciones Unidas-Agua (ONU-Agua, 2020), es el siguiente:

1. Se define un periodo de referencia, por ejemplo, el quinquenio 2000-2004.
2. Se toma el promedio de las observaciones anuales durante el periodo de referencia y se tiene la "línea base" correspondiente para los lagos y ríos.
3. Se toma otro periodo de observaciones de cinco años y se promedia de manera similar al de referencia.
4. Se calcula la variación porcentual del periodo objeto de estudio con relación al periodo de referencia mediante la siguiente expresión modificada:

$$\text{variación (\%)} = \left(\frac{(\beta - \gamma)}{\beta} \right) \times 100 \quad (1)$$

- Sea β el promedio de la extensión nacional en el periodo de referencia (2000-2004).
- Sea γ el promedio de la extensión nacional de cualquier quinquenio posterior.

La metodología realizada (Figura 2) consistió en cargar en el programa QGIS versión 3.22.3, que es un sistema de información geográfica libre y de código abierto (QGIS Equipo de Desarrollo, 2021), las imágenes satelitales y definir su sistema de proyección. Las imágenes de Landsat 7 que presentaban bandeamiento fueron corregidas como parte del preprocesamiento; luego se recortó el área de estudio. Se generaron las imágenes multiespectrales (color verdadero y falso color); se procedió a realizar el cálculo de los índices espectrales y la clasificación supervisada, esta última a partir de la aplicación informática

MultiSpecW64, que constituye un sistema gratuito de análisis de datos de imágenes multiespectrales (Purdue University, 2020). Se hizo la extracción de los cuerpos de agua y luego se generaron los mapas vectoriales con el área obtenida de cada cuerpo. El MDE permitió analizar los valores de pendiente y la red de drenaje.

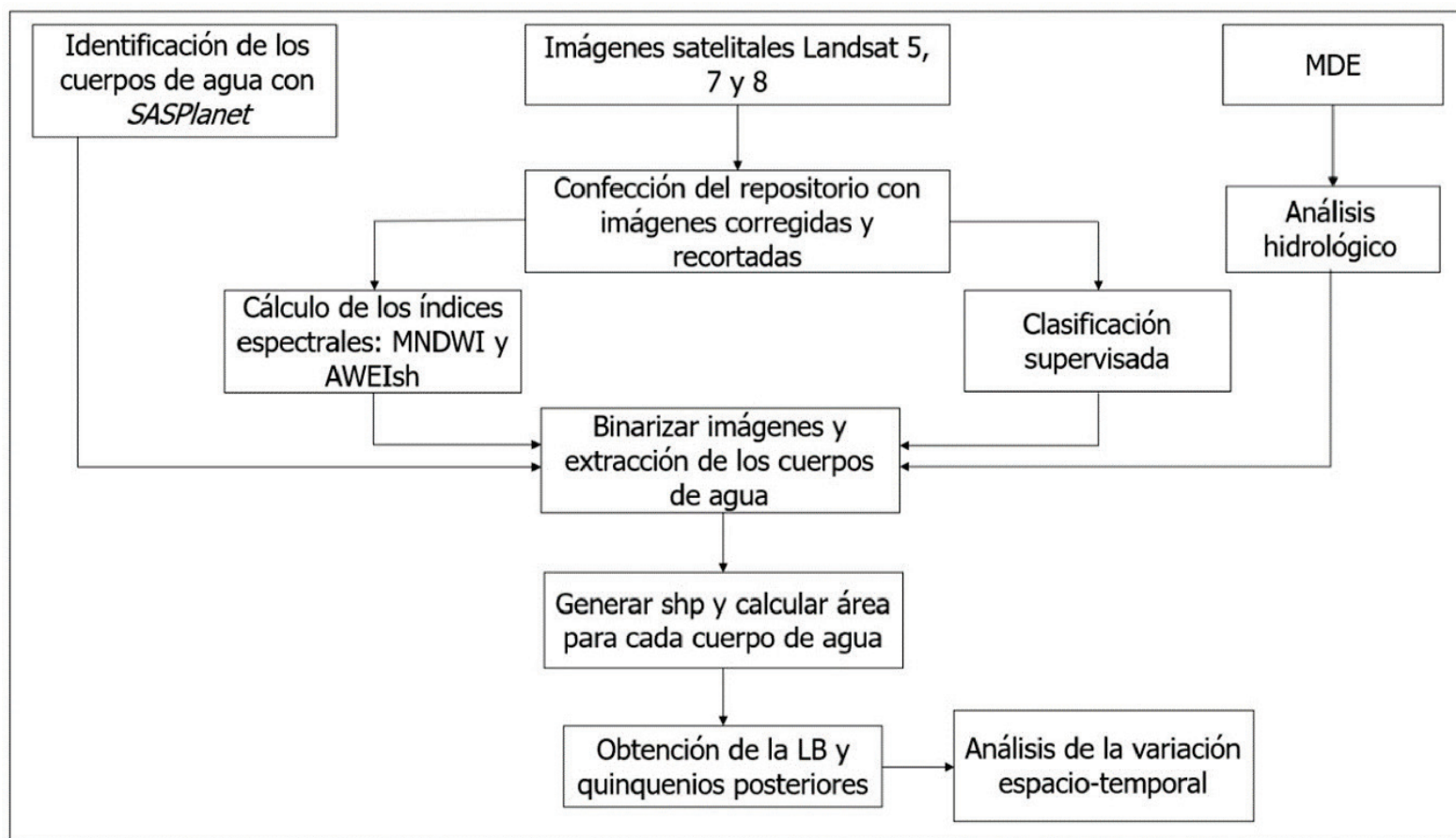


Figura 2. Flujo de trabajo.

Preprocesamiento

Las imágenes de Landsat 7 son reconocidas por sus problemas de bandeo, que genera *gaps* o líneas de ausencia de información con una ligera inclinación hacia los laterales mientras la zona central se muestra de manera correcta. Este problema se debe a un mal calibrado en los detectores que forman el sensor, un error que genera ausencia de datos y muestra la imagen a través de un bandeo de franjas o líneas paralelas entre sí (GIS & Beers, 2019).

Al realizar la corrección mejora de modo significativo la calidad de la imagen, por lo que al corregir las distorsiones se obtiene una imagen más precisa y coherente.

Combinaciones de bandas

Las imágenes multiespectrales disponen de varias bandas donde se almacena información de diversas regiones del espectro electromagnético. Los tres canales RGB (rojo, verde y azul) permiten representar los niveles digitales (ND) de una banda y obtener así una composición de color (IGN, 2018). La combinación de las bandas 3-2-1 para Landsat 5 y 7 es la que más se aproxima a los colores reales; mientras que para Landsat 8 es la combinación 4-3-2. Las bandas visibles según Fernández-Coppel y Herrero (2001) dan respuesta a la luz que ha penetrado con mayor profundidad y por tanto permiten discriminar el agua poco profunda y distinguir aguas turbias, corrientes y zonas con sedimentos.

Las combinaciones de falso color realizadas fueron las siguientes:

- NIR-R-G: Landsat 5 y 7 (bandas 4-3-2) y Landsat 8 (bandas 5-4-3)
- SWIR 1-NIR-R: Landsat 5 y 7 (bandas 5-4-3) y Landsat 8 (bandas 6-5-4)
- NIR-SWIR 1-R: Landsat 5 y 7 (bandas 4-5-3) y Landsat 8 (bandas 5-6-4)

Todas estas combinaciones se generaron a partir de la imagen multiespectral, a través del complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) del programa *QGIS*.

Índices espectrales

Los índices espectrales son herramientas fundamentales en la teledetección que permiten analizar la información contenida en las imágenes captadas por sensores remotos. Estos índices se basan en las características espectrales de los objetos y superficies, es decir, en cómo reflejan o absorben la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Su base teórica se encuentra en la interacción de la radiación electromagnética con la materia y se calculan combinando matemáticamente las reflectancias medidas en diferentes bandas espectrales.

El índice de agua de diferencia normalizada modificado (MNDWI) es una variación del NDWI (McFeeters, 1996) debido a que en zonas modificadas por el hombre la información extraída del agua a menudo se mezcla con el ruido de las zonas construidas; esto significa que algunas de estas presentan valores positivos en la imagen obtenida con la utilización del NDWI. Por ello, para este índice, en vez de utilizar el

infrarrojo cercano, se usarán las bandas SWIR, que son las bandas del infrarrojo de onda corta; en algunos casos sus reflectancias suelen ser más elevadas que las reflectancias de la banda verde (Xu, 2006). De todas maneras, los valores de las zonas modificadas por el hombre seguirán con valores negativos. Así quedaría la ecuación del nuevo índice modificado para Landsat 5 y 7:

$$\text{MNDWI} = \frac{(B2 - B5)}{(B2 + B5)} \quad (2)$$

B2 = banda 2 (verde)

B5 = banda 5 (SWIR I)

Para Landsat 8, la ecuación sería:

$$\text{MNDWI} = \frac{(B3 - B6)}{(B3 + B6)} \quad (3)$$

B3 = banda 3 (verde)

B6 = banda 6 (SWIR I)

El índice de extracción de agua automatizada (AWEI) fue desarrollado para aumentar el contraste entre las zonas de agua y zonas de no agua, con el objetivo de diferenciar ambas zonas que añaden y aplican diferentes coeficientes (Feyisa, Meilby, Fensholt, & Proud, 2014). De él se derivan dos índices, en los cuales todos los coeficientes han sido seleccionados a detalle mediante combinaciones aritméticas; también depende de las bandas elegidas por las propiedades reflectantes de diferentes tipos de cubiertas del suelo.

El AWEIsh (*shadow*) se suele usar para mejorar la eliminación de las zonas de sombra que el AWEInsh (*no shadow*) no ha sido capaz de eliminar. Se emplea en aquellas zonas donde las sombras sean un gran problema y se quieran extraer las zonas de agua con la mayor precisión. Sin embargo, aquellas zonas con una alta reflectancia, como en áreas de hielo, nieve o tejados de algunos edificios en zonas urbanas, es probable que sean confundidas y clasificadas como zonas de agua (Dolz, 2020). Para Landsat 5 y 7 sería:

$$\text{AWEIsh} = B1 + 2.5 \times B2 - 1.5 \times (B4 + B5) - 0.25 \times B7 \quad (4)$$

B1 = banda 1 (azul)

B2 = banda 2 (verde)

B4 = banda 4 (NIR)

B5 = banda 5 (SWIR I)

B7 = banda 7 (SWIR II)

Para Landsat 8, la ecuación sería:

$$\text{AWEIsh} = B2 + 2.5 \times B3 - 1.5 \times (B5 + B6) - 0.25 \times B7 \quad (5)$$

B2 = banda 2 (azul)

B3 = banda 3 (verde)

B5 = banda 5 (NIR)

B6 = banda 6 (SWIR I)

B7 = banda 7 (SWIR II)

Los índices se calcularon en la pestaña Ráster mediante la opción Calculadora Ráster, al introducir la ecuación en el programa *QGIS*.

Clasificación supervisada

En la clasificación supervisada, el conocimiento previo de la zona investigada permitió identificar áreas representativas de cada categoría (áreas de entrenamiento). El programa calcula las estadísticas elementales de cada categoría, como la media, rango y desviación estándar, a partir de los ND que definen a cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus ND (Parimbelli, 2005).

En la aplicación de análisis de imágenes satelitales *MultiSpecW64*, se comienza por abrir la imagen con cualquier combinación de banda. Se selecciona *New Project* y a continuación se definen las áreas de entrenamiento en la que se establece qué áreas de la imagen de las que se conoce su cobertura corresponden a las distintas clases a las que debe asignar todos los píxeles de la imagen. Al seleccionar las muestras, es importante tener en cuenta los límites entre los cuerpos de agua y la tierra para asignarlo como agua. Para realizar la clasificación supervisada se seleccionó el método *Gaussian Maximum Likelihood* (máxima verosimilitud Gaussiana), que asemeja la distribución real de los niveles digitales (ND), por lo que es útil para calcular la probabilidad de que un píxel (con un determinado ND) sea miembro de cierta cobertura. Es el clasificador más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo, pero es el más empleado por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos (Castañeda, 2014). Este algoritmo de

clasificación se considera el de preferencia debido a su precisión al calcular la probabilidad de pertenencia de una muestra a cada clase y luego asignar la muestra a la clase con la mayor probabilidad. Se obtiene el mapa como resultado de la clasificación supervisada en formato .TIF.

Extracción de cuerpos de agua superficiales y cálculo de la variación porcentual

A partir del cálculo de los índices de cada imagen procesada se pudo realizar la extracción de los cuerpos de agua en el programa *QGIS*. En la opción Calculadora Ráster se introdujo el índice correspondiente para filtrar los valores que sean mayores a cero. Se obtiene una imagen booleana donde el valor uno representa las aguas superficiales y el valor cero las que no lo representa. Esta imagen se vectorizó y mediante la tabla de atributos se calculó el área de los cuerpos de agua obtenidos; esto contribuyó a un filtrado de los datos en los que se eliminaron los valores menores a 4 500 m² (menor de cinco píxeles) que no fueron considerados cuerpos de agua. La superposición del mapa vectorial de los cuerpos obtenidos en el *SASPlanet*, el mapa vectorial de la extracción realizada y los índices calculados facilitó la eliminación de nubes, sombras y otros cuerpos. Mediante la opción Unir atributos por localización, se pudieron añadir los identificadores, al emplear los dos *shapefile* ya mencionados.

Se obtiene además un archivo .xlsx que contiene información detallada sobre las áreas de los cuerpos de agua presentes en la línea base, así como en los quinquenios posteriores. Lo anterior permite calcular la variación porcentual de los ecosistemas relacionados con el

agua mediante la ecuación establecida en el procedimiento de la ONU-Agua (2020).

Resultados

Se obtuvieron de forma preliminar con *SASPlanet* alrededor de 1 100 cuerpos de aguas superficiales que abarcan el área de estudio, entre los que destacan los embalses Hanabanilla, Alacranes y Zaza como algunos de los principales embalses de la región y del territorio nacional. Estos resultados se tomaron como referencia para hacer la comparación en cuanto a extensión y obtener la variación espacio-temporal.

A partir del modelo digital de elevaciones se realizó el análisis de pendiente que proporciona la distribución de ese parámetro en la región investigada, en la cual los sectores con pendientes entre 30 y 45 grados responden a las montañas de Guamuhaya, lo cual indica que en las mismas el agua escurre y no hay posibilidades de almacenamiento, razón por la cual la presencia de ecosistemas relacionados con el agua está limitada al embalse Hanabanilla, ubicado en la cúpula Trinidad, en antiguos valles anegados con el embalse. Además, predominan los sectores llanos, con pendientes menores a 30 grados, lo que justifica la presencia de los numerosos cuerpos de agua identificados. Se determinaron las zonas favorables para la acumulación de agua, en la que se superpusieron los cuerpos identificados con *SASPlanet* (Figura 3). Al considerar el análisis de pendiente, se observó que el intervalo de 0 a 15 grados contiene los valores bajos. Por lo tanto, se consideró filtrar con un valor umbral de 10 grados para identificar las zonas favorables y así establecer la correlación con la ubicación de todos los ecosistemas detectados.

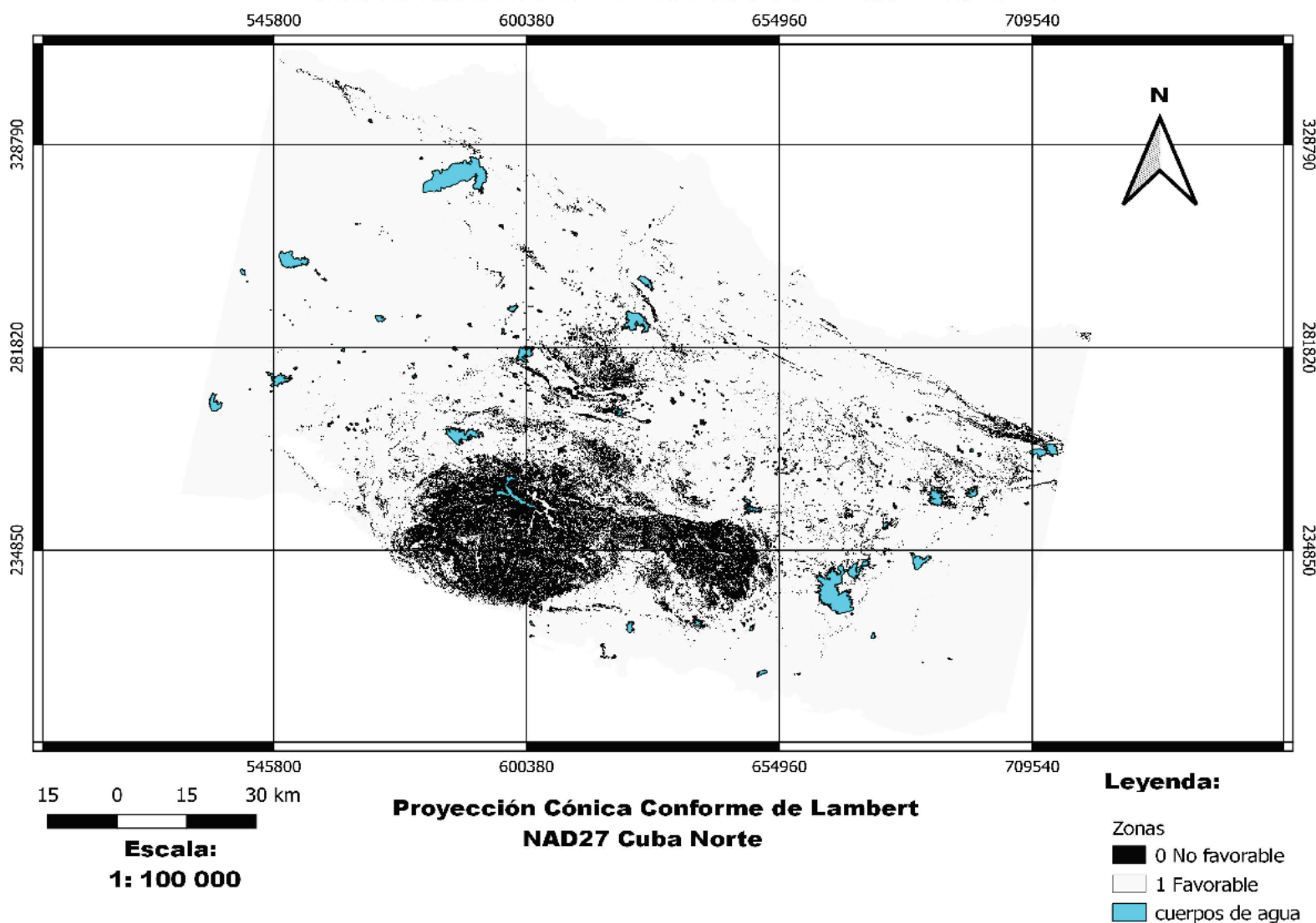


Figura 3. Mapa de zonas favorables para la acumulación de agua.

La red de drenaje representa el conjunto de canales naturales o artificiales que conforman el sistema de transporte de agua en la región (Figura 4). Esta red se forma a partir de los ríos y arroyos que recogen y conducen el agua de lluvia hacia los cuerpos de agua identificados o al mar. No presenta una configuración homogénea, lo cual indica que

transcurre por zonas de litología variable; permite la interpretación de algunas fallas al norte de la región y la identificación de configuraciones radiales que coinciden con las cúpulas Trinidad y Sancti Spíritus; además se observan sectores de cursos inconexos asociados con procesos de carstificación, en los cuales no es posible la acumulación de agua.

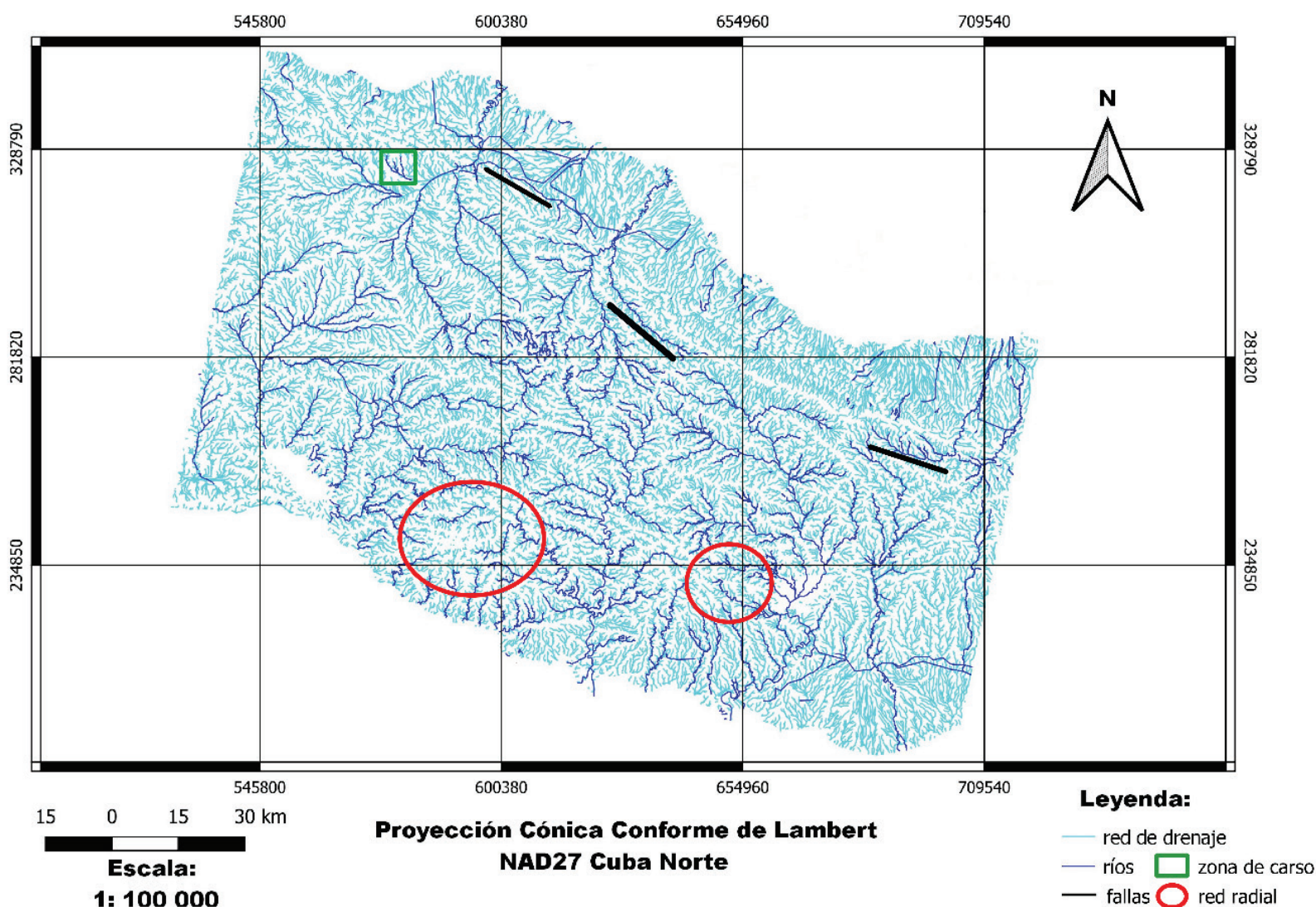


Figura 4. Mapa de red de drenaje del área de estudio.

Para realizar la extracción de los cuerpos de agua superficiales se emplearon los índices espectrales MNDWI y AWEIsh en dependencia de las características del área. En ambos casos, estos cuerpos están representados por valores positivos (color negro). Al filtrar los valores mayores se genera una imagen booleana que solo contiene dos valores posibles: cero y uno. Esto permite identificar agua y no agua, al tener en cuenta que el valor uno representa el color blanco (presencia) y el valor cero el color negro (ausencia).

Para la clasificación supervisada de las imágenes satelitales del quinquenio 2010-2014, se utilizó un conjunto de áreas de entrenamiento para reconocer los cuerpos de agua. Se seleccionaron cuatro clases (agua, tierra, nubes y sombras) basadas en una combinación de falso color (NIR-R-G), conocimiento previo del área de interés e interpretación visual de la imagen.

A partir de la aplicación *Análisis SHP*, se obtuvo el área máxima y mínima de cada cuerpo de agua superficial. La Tabla 4 muestra la cantidad de cuerpos distintos identificados en las dos escenas de trabajo durante los tres quinquenios de análisis. Se observa cómo la cantidad de identificadores varía tanto entre escenas como entre quinquenios.

Tabla 4. Cuerpos de agua con diferente ID identificados en *Análisis SHP*.

Quinquenios	Escenas	Cantidad de ID diferentes	Total
2000-2004	14-44	71	374
	14-45	303	
2005-2009	14-44	82	380
	14-45	298	
2010-2014	14-44	178	601
	14-45	423	

La Figura 5 muestra el valor total de área mínima, media y máxima para cada año correspondiente a la línea base. En el año 2000 se registró el área mínima con 74.43 km², la media fue de 176.87 km² y la máxima 294.84 km² en 2001; lo mismo se aplicó para los quinquenios posteriores.

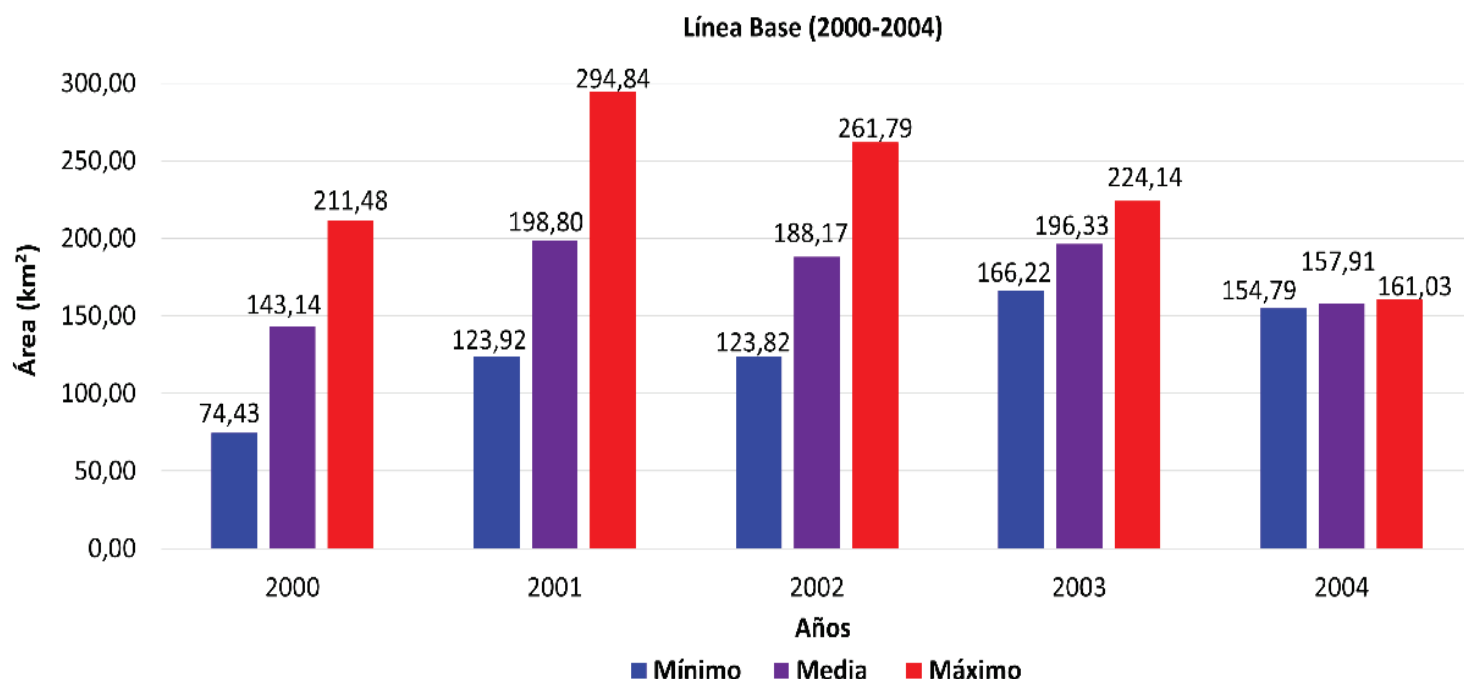


Figura 5. Representación gráfica de los valores de extensión de los cuerpos de agua superficiales en la línea base.

En la Figura 6 se presenta el valor total de área mínima, media y máxima para cada quinquenio de estudio. El quinquenio 2005-2009, según los valores mínimos, disminuyó con respecto a la línea base en 18.68 km²; mientras que el quinquenio 2010-2014 aumentó en unos 3.15 km². En cuanto a los valores máximos registrados, ambos quinquenios se incrementaron con respecto a la LB; el primero en 11.55 km² y el segundo en 45.47 km².

Comportamiento en cada quinquenio

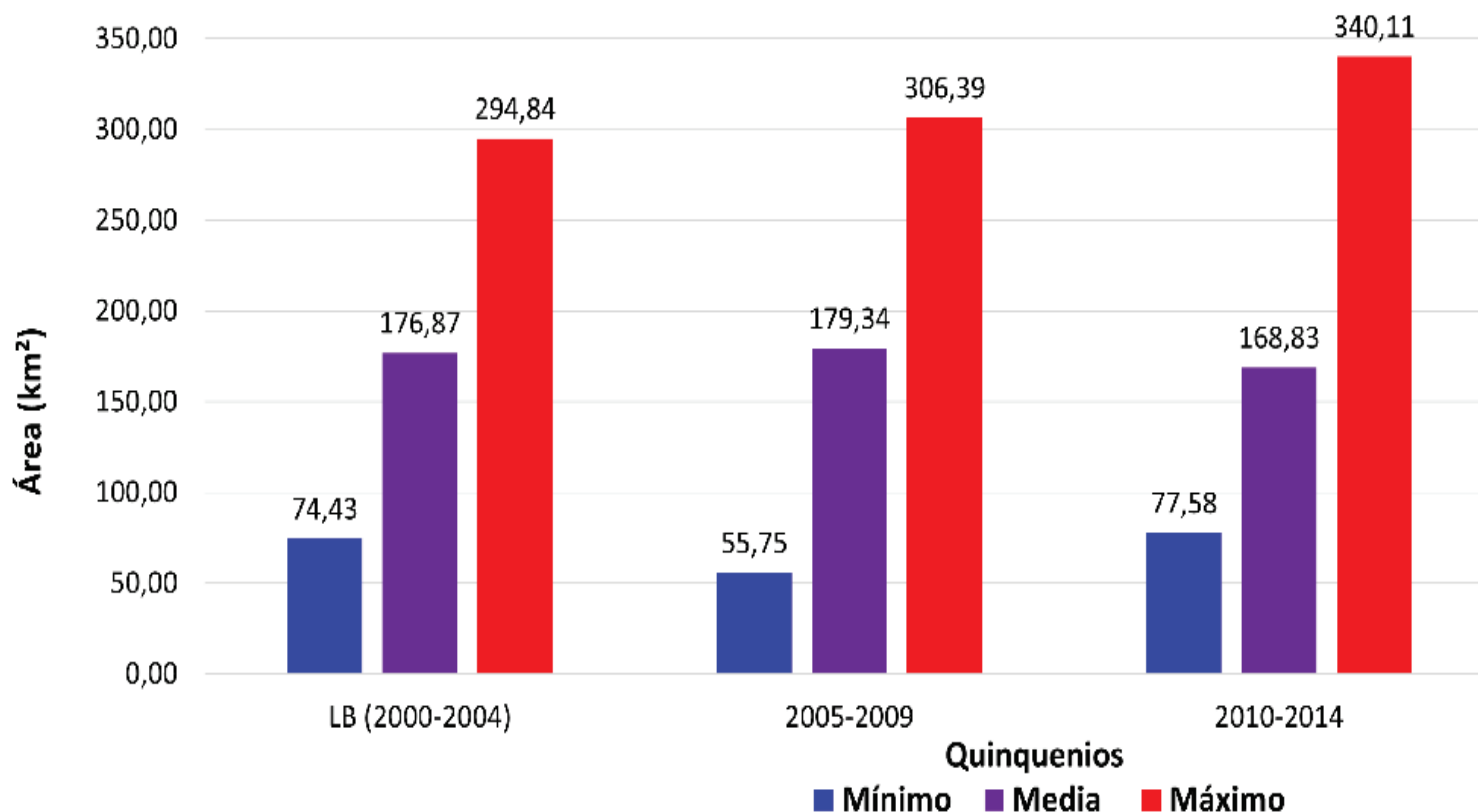


Figura 6. Representación gráfica de los valores de extensión de los cuerpos de agua superficiales en cada quinquenio de estudio.

El procedimiento descrito en el indicador 6.6.1 para el estudio de la variación espacio-temporal de estos ecosistemas permitió determinar el porcentaje de pérdida (valores positivos) o aumento (valores negativos) en cuanto a la extensión de estos cuerpos, a partir del periodo de referencia establecido (2000-2004). La línea base está representada por la línea cero; mientras que las barras de color azul y rojo representan los quinquenios 2005-2009 y 2010-2014, respectivamente (Figura 7). El comportamiento muestra una tendencia creciente en el primer quinquenio

de 1.4 %, mientras que el último quinquenio de análisis indica una tendencia decreciente de 4.55 %.

Variación espacio-temporal

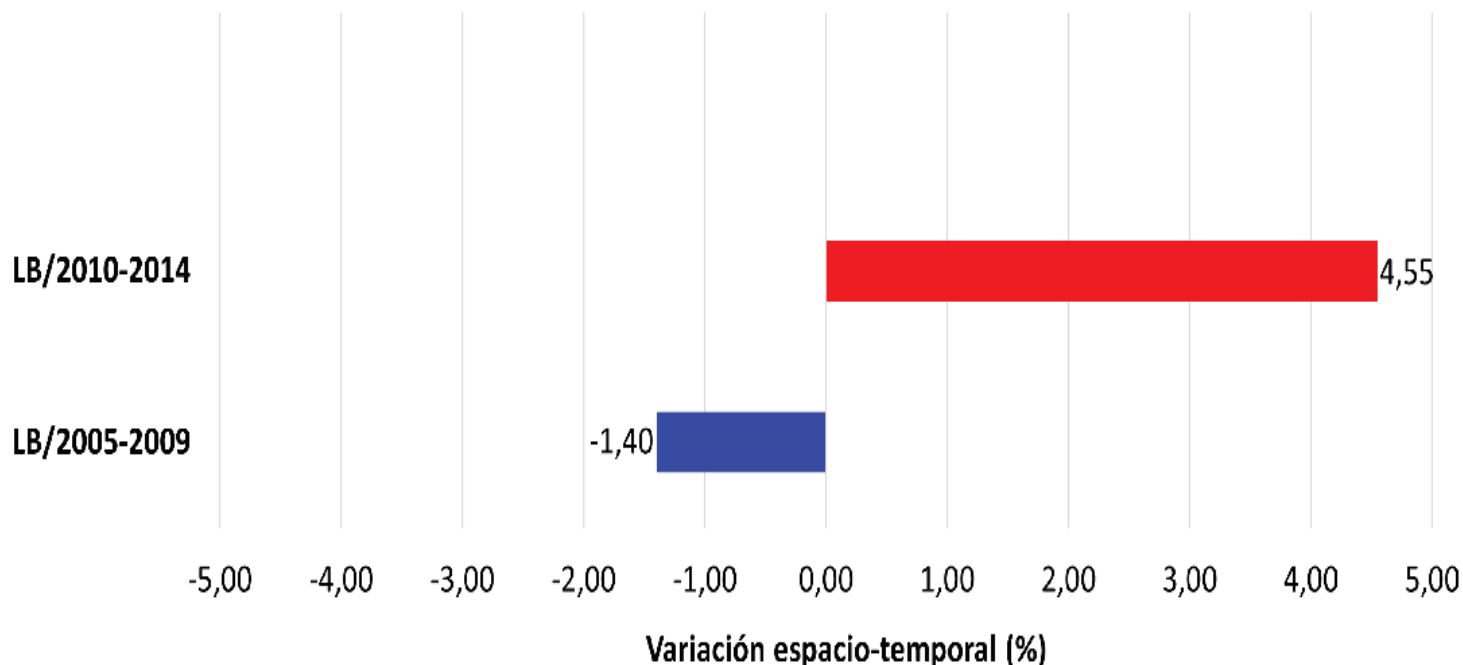


Figura 7. Variación espacio-temporal de los cuerpos de agua superficiales de los quinquenios 2005-2009 y 2010-2014 respecto a la línea base.

Para una representación más detallada se seleccionaron los embalses Hanabanilla, Alacranes y Zaza debido a su extensión y relevancia a nivel nacional por su capacidad de almacenamiento. La Tabla 5 presenta el promedio en extensión, expresado en kilómetros cuadrados (km^2) de estos embalses para los tres quinquenios y el cambio porcentual con respecto a la línea base.

Tabla 5. Variación espacio-temporal de los embalses Hanabanilla, Alacranes y Zaza.

Nombres (embalses)	ID	Promedio (km ²)			Cambio porcentual		Aumento o pérdida	
		LB	2005-2009	2010-2014	2005-2009	2010-2014	2005-2009	2010-2014
Hanabanilla	1 078	11.82	13.74	9.66	-16.25	18.29	Aumento	Pérdida
Alacranes	1 069	41.18	52.45	49.39	-27.36	-19.94	Aumento	Aumento
Zaza	1 090	41.34	44.54	39.20	-7.75	5.17	Aumento	Pérdida

En la Figura 8 se muestra la variación espacio-temporal (%) obtenida. De esta se puede indicar, a modo general, que tanto el embalse Hanabanilla como Zaza sufrieron un incremento durante el primer quinquenio y un decrecimiento durante el segundo con respecto a la LB. Alacranes, sin embargo, aumentó su extensión en ambos quinquenios.

Variación espacio-temporal

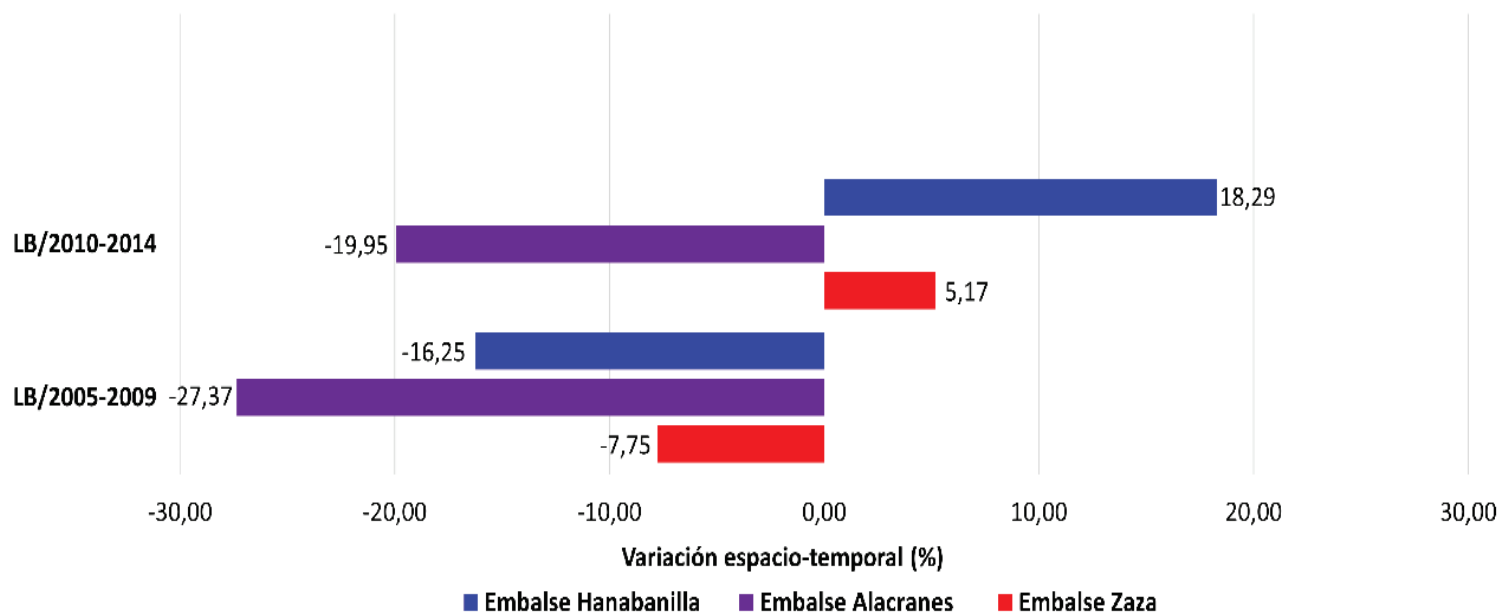


Figura 8. Variación espacio-temporal de los embalses Hanabanilla, Alacranes y Zaza en los quinquenios 2005-2009 y 2010-2014 respecto a la línea base.

Discusión

Según la base de datos suministrada por la empresa Geocuba, al delimitar los ecosistemas relacionados con el agua mediante el empleo del *SASPlanet*, se evidenciaron en un primer momento cambios en su extensión, además de que se identificó un número mayor de cuerpos a los registrados con anterioridad.

El modelo digital de elevación permitió obtener la pendiente y configuración de la red de drenaje, que constituyen datos útiles en las investigaciones hidrológicas. Ellos proporcionan información sobre la dirección de la escorrentía superficial, la posible ubicación de los

ecosistemas relacionados con el agua y las zonas donde estos no pueden encontrarse debido al desarrollo de procesos de carstificación.

La confección de imágenes satelitales de color verdadero y falso color permite visualizar y analizar la distribución espacial de la vegetación y el agua en la región. Además, las combinaciones de falso color resaltan las diferencias sutiles en la reflectancia de la superficie, lo que se considera útil para identificar áreas con diferentes tipos de vegetación, humedad del suelo y cuerpos de agua, al ser este último el de particular interés. También ayudan a identificar los cambios en el agua a lo largo del tiempo. Así, las combinaciones seleccionadas se hicieron con el propósito de comprobar de manera visual la presencia de estos cuerpos y posibles variaciones.

El índice AWEIsh logra dar mejores resultados que el MNDWI, al tomar en cuenta la presencia de sombras en la imagen, lo que afecta la precisión de la detección de cuerpos de agua. No obstante, es posible que el MNDWI ofrezca mejores resultados en áreas donde la presencia de sombras no es un problema importante y donde la vegetación circundante no afecta significativamente la identificación de estos cuerpos. Por lo anterior, la elección del índice espectral adecuado dependerá de las condiciones específicas y del área de estudio.

El empleo de la combinación de falso color (NIR-R-G) es ventajoso para identificar los límites entre el suelo y el agua al resaltar determinadas características de los datos de la imagen, que son relevantes para la clasificación supervisada. La selección adecuada permite mejorar la separación de las clases y aumentar la precisión.

Según los resultados obtenidos de la extracción de los ecosistemas relacionados con el agua mediante las dos técnicas empleadas, la

clasificación supervisada presenta mayor precisión al extraer los cuerpos de agua superficiales debido a que estos poseen una firma espectral única y distintiva. Ello significa que la reflectancia de la luz en la superficie del agua es diferente a la reflectancia de la luz en la superficie del suelo o de la vegetación circundante. Además, de la alta resolución espacial de las imágenes, en este caso se trabaja con imágenes de Landsat que, aunque la resolución espacial oscila entre los 30 y 60 metros, logra detectar cuerpos pequeños o con formas irregulares. Por tanto, al utilizar esta técnica de clasificación se consiguen identificar y separar más fácil los cuerpos de agua de otras clases de cobertura terrestre.

El cálculo de los índices espectrales y la clasificación supervisada realizada en esta investigación se destaca entre los métodos más empleados para la extracción de agua superficial, según Huang, Chen, Zhang y Wu (2018), además del empleo de las imágenes Landsat como fuente de datos más común para calcular estos índices debido a sus bandas espectrales adecuadas, así como a su resolución espacial media.

Algunos cuerpos de agua identificados en la región sur de la escena 14-45 coinciden con los resultados de Hernández (2022), aunque este estudio empleó una metodología diferente y no se pueden comparar las extensiones debido, entre otras causas, a que el estudio previo solo analizó los años 2011, 2016 y 2020. El presente trabajo se distingue por aplicar índices espectrales y un algoritmo de clasificación supervisada distintos que abarca una mayor área de estudio de esa región; además, la aplicación de la metodología 6.6.1 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) es pionera en esta zona y sienta las bases para futuras investigaciones.

La tendencia de incremento en la extensión es probable que sea causada por diversas razones: un incremento del caudal de agua que llega

al embalse por lluvias intensas; la construcción de nuevas presas aguas arriba del embalse, lo que aumenta el volumen de agua almacenado; cambios en la topografía del terreno que permiten la expansión del embalse, como la excavación de nuevos canales o la eliminación de obstáculos naturales; modificaciones en la gestión del agua, como la reducción de la descarga de agua del embalse para mantenerlos más altos, y cambios en el clima que pueden aumentar el nivel de los ríos y lagos que lo alimentan. Las causas que generan la pérdida de extensión probablemente se asocian, en primer lugar, con la extracción excesiva del agua para uso humano, agrícola o industrial, lo que reduce el volumen almacenado; la sedimentación del embalse debido a la erosión del suelo aguas arriba, y otros comportamientos contrarios a las causas que se mencionan con anterioridad, que propician el aumento de los mismos. El análisis se centró en la descripción de los cambios observados. Debido al gran volumen de datos y al hecho de que no forma parte de los objetivos planteados, no se llevó a cabo un estudio en profundidad de las causas que lo provocaron.

La base de datos no dispone de imágenes para todos los meses de cada año, lo que impide un análisis de calidad homogéneo entre periodos lluviosos y pocos lluviosos. Esta falta de uniformidad, sumada a la influencia de las nubes en el procesamiento de imágenes, puede afectar la precisión en la determinación de la extensión de los cuerpos de agua. En algunos casos, el proceso de extracción fue afectado por la inclusión de nubes en los bordes, lo que resultó en la sobreestimación del área y la consecuente eliminación del cuerpo de agua del análisis. Si bien no se realizó la validación en esta etapa, los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones que incluyan procesos de validación rigurosos.

Conclusiones

El análisis del modelo digital de elevación permitió identificar áreas propensas para la acumulación de agua y corroborar la presencia de los cuerpos cartografiados a partir de la identificación en *SASPlanet*. El índice espectral MNDWI y la clasificación supervisada demostraron ser herramientas efectivas para delimitar con precisión los cuerpos de agua superficiales.

Se observó un crecimiento del 1.40 % de los ecosistemas relacionados con el agua entre 2005 y 2009, seguido de un decrecimiento del 4.55 % entre 2010 y 2014, en comparación con la línea base. Resultó fundamental conocer el comportamiento de los principales embalses, como Hanabanilla, Alacranes y Zaza, para una gestión sostenible y eficiente de los recursos hídricos, y el bienestar de las poblaciones que dependen de ellos, por lo que su monitoreo continuo es de vital importancia.

El empleo de imágenes Landsat, índices espectrales y clasificación supervisada proporcionó buenos resultados sobre los cambios en la extensión de los cuerpos de agua a lo largo del tiempo. Por tanto, la investigación contribuyó al cumplimiento del indicador 6.6.1 para la zona de estudio. No obstante, se podría profundizar en temas como el análisis de la calidad de agua, modelación hidrológica, estudios de la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, análisis de la demanda y uso del agua, que ha cambiado con el tiempo, y cómo esto podría afectar la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro.

Referencias

- Alsdorf, D. E., Rodríguez, E., & Lettenmaier, D. P. (2007). Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 1-24. <https://doi.org/10.1029/2006RG000197>
- Castañeda, E. D. (2014). *Análisis multitemporal del cuerpo de agua de la laguna El Sonso mediante imágenes satelitales Landsat*. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/84586b67-d4be-4e1c-9b6f-71a030804d19/content>
- Chen, J., Cui, T., Wang, W., Liu, G., Gilfedder, M., & Bai, Y. (2018). Spatio-temporal evolution of water-related ecosystem services: Taihu Basin, China. *PeerJ*, 6(e5041). <https://doi.org/10.7717/peerj.5041>
- Dolz, S. (2020). *Cartografía de masas de aguas utilizando imágenes WorldView-3 en el Marjal de Gandía* (tesis de grado). Universitat Politècnica de València, Gandia, España.
- Escambray. (2023). *Cuando el agua se pone jíbara*. Recuperado de <http://www.escambray.cu/especial-agua-jibara/rios-sancti-spiritus/>
- Fernández-Coppel, I., & Herrero, E. (2001). *El satélite Landsat: análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+satélite Landsat*. Universidad de Valladolid. Valladolid, España: Recuperado de https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/12tq2h1/alma991006510069705774

- Ferrer, M., Ruíz, A., Dimas, M., & Estrela, T. (1998). Aportación de la teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva. *Ingeniería del Agua*, 5(1), 35-46. <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2742>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environmental*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Geocuba. (2002). *Mapa digital de hidrología superficial*. La Habana, Cuba: Geocuba.
- Geocuba. (2015). *Modelo digital de elevaciones*. La Habana, Cuba: Geocuba.
- GIS & Beers. (2019). *Cómo corregir el bandeo de imágenes Landsat 7*. Recuperado de <http://www.gisandbeers.com/corregir-bandeado-imagenes-landsat-7/>
- González, D. (2022). *Aplicación de la teledetección al estudio de la variación espacio temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en el sector Las Tunas-Holguín de la República de Cuba* (tesis de grado). Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba.
- Guerra, M. (2022). *Aplicación de la teledetección en el estudio de las variaciones espacio-temporales de los cuerpos de agua superficial. Caso de estudio: Región Suroriental de Cuba* (tesis de grado). Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba.

- Hernández, C. (2022). *Aplicaciones de la teledetección al estudio de la variación espacio temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en un sector de la región Centro-Occidental de Cuba* (tesis de grado). Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba.
- Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*, 56, 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
- IGP, Instituto de Geología y Paleontología. (2011). *Mapa geológico de Cuba*. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología.
- INE, Instituto Nacional de Estadística. (2021). *Indicadores de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.ine.es/dyngs/ODS/es/index.htm>
- Jiménez, S. (2016). *Combinación RGB con bandas del satélite Landsat 5, 7 y 8*. Recuperado de <https://www.hidraulicafacil.com.mx/2016/03/Com.Landsat7.html>
- Magdaleno, F., & Martínez, R. (2006). Aplicaciones de la teledetección láser (LiDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ingeniería Civil*, (142), 1-15.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7). <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

- Mesa, D. J. (2009). Algunos atributos de los factores a favor y en contra en las técnicas y métodos utilizados para la estimación de caudales ambientales en Colombia. *Umbral Científico*, (15), 81-93. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30415144010>
- Morales, A. (2022). *SAS Planet: descarga imágenes de Google, Bing, etc.* Recuperado de <https://mappinggis.com/2024/01/como-descargar-imagenes-de-google-bing-etc/>
- IGN, Instituto Geográfico Nacional. (2018). *El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial: Fundamentos de teledetección aplicada.* Recuperado de <https://www.ign.es>
- ONEI, Oficina Nacional de Estadística e Información. (2022). *Anuario estadístico de Cuba 2021.* Recuperado de <https://www.onei.gob.cu/anuario-2021>
- ONU-Agua, Organización de las Naciones Unidas-Agua. (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el cambio climático y el agua, septiembre de 2019.* Recuperado de https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf
- ONU-Agua, Organización de las Naciones Unidas-Agua. (2020). *Cálculo del cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo: metodología de seguimiento del indicador 6.6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.* Recuperado de https://files.habitatseven.com/unwater/SDG-indicator-661-methodology_Spanish.pdf

- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Parimbelli, M. H. (2005). *Clasificación supervisada - Multispec*. Recuperado de <https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/59082/67332/Tutorial%20Multispec.%20Clasificación%20Supervisada>
- Passucci, V., Carmona, F., & Rivas, R. (2017). Identificación de zonas anegadas y no anegadas mediante técnicas de teledetección. *Estudios Ambientales*, 5(2), 51-78. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v5i2.715>
- Pérez, M. E., & García, P. (2006). Aplicaciones de la teledetección en hidrología. *Observatorio Medioambiental*, (9), 171-186.
- Purdue University. (2020). *MultiSpec Application* (v. 2020.02.29). Recuperado de https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/download_win.html
- Qadir, A., Malik, R. N., & Husain, S. Z. (2008). Spatio-temporal variations in water quality of Nullah Aik-tributary of the river Chenab, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140(1), 43-59. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9846-4>
- QGIS Equipo de Desarrollo. (2021). *QGIS* (v. 3.22.3-Białowieża). Recuperado de <https://www.qgis.org/>

- Sharma, K. D., Singh, S., Singh, N., & Kalla, A. K. (1989). Role of satellite remote sensing for monitoring of surface water resources in an arid environment. *Hydrological Sciences Journal*, 34(5).
<https://doi.org/10.1080/02626668909491360>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14).
<https://doi.org/10.1080/01431160600589179>