

VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL EN EL PERÍODO 2000 AL 2020 EN EMBALSES DE LA PROVINCIA MAYABEQUE, CUBA

SPATIO TEMPORAL VARIATION 2000 TO 2020 PERIOD IN MAYABEQUE'S DAMS, CUBA

Isabela DÍAZ PÉREZ, Willy Roberto RODRÍGUEZ MIRANDA, Rosa María VALCARCE ORTEGA, Ernesto SOLÍS MORALES

Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Calle 114 No. 11901, Marianao, La Habana, Cuba.
E-mail: diazisabela024@gmail.com; wrodriguezr@gmail.com; rvalcarce1959@gmail.com; solismoralesernesto@gmail.com

Introducción
Características del área de estudio
Materiales y métodos
Índices espectrales en la detección de cuerpos de agua
Metodología de seguimiento del indicador 6.6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible
Aplicación de la metodología en el área de estudio
Resultados y discusión
Conclusiones
Referencias

RESUMO – Os ecossistemas relacionados com a água proporcionam importantes benefícios econômicos e sociais em todos os países, razão pela qual a sua proteção se tornou uma prioridade estratégica. Particularmente em Cuba, a disponibilidade de água representa um grande desafio para alcançar o desenvolvimento econômico e a segurança alimentar. Esta pesquisa realizou um estudo da variação espaço-temporal dos principais reservatórios da província de Mayabeque durante os anos 2000 a 2020, tomando como base o quinquênio 2000 - 2004. Foi aplicada a metodologia aprovada pela Organização das Nações Unidas para monitoramento do indicador 6.6.1 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Foram utilizados os índices espectrais MNDWI e AWEI_{sh} calculados a partir das imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8. Os resultados mostraram uma acentuada tendência de diminuição das áreas dos reservatórios analisados, o que corresponde ao comportamento do clima em Cuba nas últimas décadas e salienta a necessidade de alcançar uma gestão hídrica abrangente e sustentável que não comprometa a integridade ecológica das bacias e a resposta à procura crescente deste recurso vital.

Palavras-chave: Variação espaço-temporal. Sensoriamento remoto. Índices MNDWI e AWEI_{sh}. ODS 6.6.1.

RESUMEN – Los ecosistemas relacionados con el agua aportan importantes beneficios económicos y sociales en todos los países por lo que su protección se ha convertido en prioridad estratégica. Particularmente en Cuba, la disponibilidad de agua representa un gran desafío para lograr el desarrollo económico y la seguridad alimentaria. Esta investigación realizó un estudio de la variación espacio temporal de los principales embalses de la provincia Mayabeque durante los años 2000 al 2020, tomando como línea base el quinquenio 2000 – 2004. Fue aplicada la metodología aprobada por la Organización de Naciones Unidas para el seguimiento del indicador 6.6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se emplearon los índices espectrales MNDWI y AWEI_{sh} calculados de las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8. Los resultados mostraron marcada tendencia a la disminución de las áreas de los embalses analizados lo cual se corresponde con el comportamiento del clima en Cuba en las últimas décadas y señala la necesidad de lograr una gestión integral y sostenible del agua que no comprometa la integridad ecológica de las cuencas y la respuesta a la creciente demanda de este recurso vital.

Palabras claves: Variación espacio temporal. Teledetección. Índices MNDWI y AWEI_{sh}. ODS 6.6.1.

ABSTRACT – Water-related ecosystems provide important economic and social benefits in all countries, which is why their protection has become a strategic priority. Particularly in Cuba, the availability of water represents a great challenge to achieve economic development and food security. This research carried out a study of the spatio-temporal variation of the main reservoirs of the Mayabeque province during the years 2000 to 2020, taking the five-year period 2000 - 2004 as a baseline. The methodology approved by the United Nations Organization was applied to monitor indicator 6.6.1 of the Sustainable Development Goals. The MNDWI and AWEI_{sh} spectral indices calculated from the Landsat 5, 7 and 8 satellite images were used. The results showed a marked tendency to decrease the areas of the analyzed reservoirs, which corresponds to the behavior of the climate in Cuba in recent decades and points out the need to achieve comprehensive and sustainable water management that does not compromise the ecological integrity of the basins and the response to the growing demand for this vital resource.

Keywords: Spatial temporal variation. Remote sensing. MNDWI and AWEI_{sh} indices. SDG 6.6.1.

INTRODUCCIÓN

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas de la Agenda 2030 comprenden varios indicadores que cuantifican aspectos específicos sobre los ecosistemas relacionados con el agua. En particular se destaca la meta 6.6 de la cual se deriva el indicador 6.6.1, dedicado en exclusiva

a medir las variaciones de la cantidad, calidad y extensión de estos ecosistemas, con el objetivo de protegerlos y garantizar que puedan seguir prestando servicios hídricos sostenibles a la sociedad.

Cuba es una de las naciones que cuenta con

una legislación para normar el empleo racional y productivo del recurso hídrico. La Ley N^o 124 de las Aguas Terrestres regula la gestión integrada y sostenible de este recurso con el fin de lograr su uso y preservación en armonía con el desarrollo socioeconómico sostenible, y promueve la adecuada aplicación de la ciencia y la tecnología con este propósito en total correspondencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ANPP, 2017).

La reserva de agua en Cuba constituye el principal desafío para garantizar el desarrollo económico, la seguridad alimentaria y ambiental. Sus recursos hídricos disponibles anualmente alcanzan una media a nivel nacional de 1 220 m³ por persona, lo que sitúa al país en un nivel de estrés hídrico moderado (Díaz, 2018).

Entre los factores de origen natural que provocan la carencia de agua se distingue la tendencia decreciente de la media histórica nacional de las precipitaciones, unida a una sostenida tendencia creciente de la temperatura media anual durante el período 1951 – 2020 (Díaz, 2018; Fonseca et al., 2021). En el siglo XXI Cuba ha vivido tres de los eventos más significativos de sequía (2003 – 2005, 2009 – 2010 y 2014 – 2015) y se estima que para el año 2050 puede haber una reducción de aproximadamente entre el 5 y el 10% de las precipitaciones en el período lluvioso. En este escenario, donde las sequías son cada vez más recurrentes debido fundamentalmente a la disminución de las precipitaciones, fuente principal del llenado de los embalses en Cuba, el desarrollo de investigaciones que permitan conocer la variación espacio temporal del agua acumulada en los embalses resulta estratégico para promover una gestión integral de este recurso que tenga en cuenta la reducción de riesgos y la adaptación al cambio climático.

Durante décadas, Cuba ha trabajado intensamente por incrementar la disponibilidad de recursos hídricos y resultado de esos esfuerzos son los 242 embalses construidos y distribuidos por todo el país, que tienen una capacidad de almacenamiento de 9 mil millones de m³ de agua

y benefician a más de 2.400 asentamientos humanos. Estos embalses se han construido aprovechando el cauce natural de las corrientes de aguas superficiales y todos poseen obra de toma, desde el vaso de la presa hacia estaciones de bombeo, para abastecer a la población, la agricultura y la industria.

A nivel internacional se ha utilizado la teledetección como fuente de información fundamental para determinar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua, lo cual se demuestra en las investigaciones de Sharma et al. (1989), McFeeters (1996), Kovac et al. (2005), Ke et al. (2005), Xu (2006), Khalid et al. (2021), Makaka et al. (2021), que analizan el comportamiento de diferentes índices espectrales calculados sobre las imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8, y complementan sus trabajos aplicando técnicas de reconocimiento de patrones y empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El uso de la teledetección en investigaciones de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua no es muy común en Cuba.

Destacan en este sentido los trabajos de Miravet et al. (2014) quienes, empleando métodos de investigación bibliográfica, tratamiento digital de imágenes satelitales, mapas topográficos y Sistemas de Información Geográfica (SIG), elaboraron una cronología de la evolución espacio-temporal de la laguna Ariguanabo en el período comprendido entre 1700 y 2013. Álvarez & Pérez (2004) y Denis et al. (2020) emplearon imágenes satelitales Landsat para determinar la distribución espacial y temporal en manglares cubanos utilizando fotografías aéreas, mapas topográficos y aplicando índices espectrales.

En la presente investigación se hace un estudio de la variación espacio temporal de los embalses Jaruco, Canasí, Caunavaco y Mampostón, para el período comprendido entre los años 2000 – 2020, aplicando, por primera vez en Cuba, la metodología propuesta para el seguimiento del indicador 6.6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas de la Agenda 2030.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los embalses Jaruco, Canasí, Caunavaco y Mampostón se encuentran ubicados en la región occidental de Cuba, en la provincia de Mayabeque (Figura 1).

Los embalses Canasí y Caunavaco se localizan en el municipio de Santa Cruz del Norte, a cuatro

kilómetros del poblado Arcos de Canasí y cinco kilómetros al suroeste del poblado de Corral Nuevo respectivamente. El embalse Jaruco se encuentra en el municipio de Jaruco, a cinco kilómetros al norte del pueblo de mismo nombre, y el embalse Mampostón está situado cerca de las

localidades de San Marcos y Santo Domingo en el municipio de San José de las Lajas.

El río de mayor importancia en esta provincia es el río Mayabeque con una extensión total de 53 km y numerosos afluentes y efluentes. Otros ríos de importancia son Jaruco, Jibacoa y Canasí. El relieve está caracterizado por las Alturas Habana – Matanzas y las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo; las cuales transcurren casi paralelamente de este a oeste. Las mayores alturas de la provincia son La Loma del Grillo con 321 m, en las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo, y El Palenque con 331 m en las Alturas Habana – Matanzas, elevación vecina del conocido

Pan de Matanzas. Una cadena de elevaciones menores bordea la costa norte en la cual aparecen abras por la que desembocan los ríos.

Predominan fértiles suelos rojos ferralíticos, también se presentan suelos pardos, húmico calcimórficos y fersialíticos y en menores porciones se hallan suelos hidromórficos, aluviales y ferríticos. Tanto en las alturas, como en los valles son comunes las manifestaciones cársticas como cavernas, furnias, embudos cársticos y sumideros. Posee una llanura meridional cárstica que almacena importantes recursos hídricos subterráneos que abastecen a la población de Mayabeque y de La Habana.

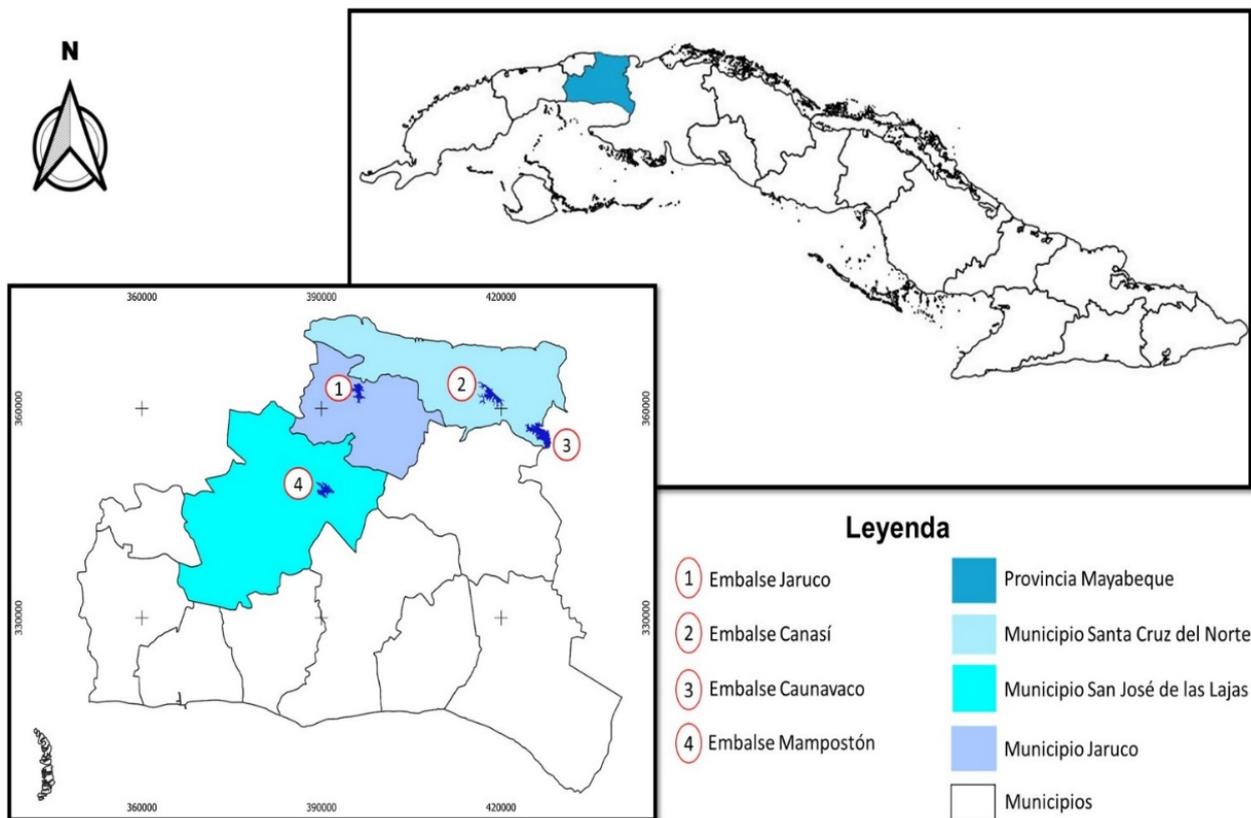


Figura 1 - Ubicación geográfica del área de estudio.

El clima clasifica como tropical de sabana, con temperatura media anual de 29°C, caracterizado por veranos cálidos y nublados e inviernos cortos, húmedos, secos y mayormente despejados. La nubosidad varía en el transcurso del año. La época más despejada de nubes comienza en octubre y termina en mayo, precisamente el período donde las precipitaciones son pocas o casi nulas; y la época con abundantes nubes comienza en mayo y culmina en octubre, período que suele ser el más lluvioso. Las temperaturas son bajas en el invierno llegando en ocasiones a valores menores de 10°C y en verano hasta 36°C.

Están presentes varios de los complejos paleotectónicos que representan al basamento plegado

de Cuba. Se describen cuerpos de rocas máfico – ultramáficas pertenecientes a la Asociación Ofiolítica. Estos cuerpos poseen forma alargada y no son muy potentes, generalmente intercalados tectónicamente con secuencias vulcanógeno-sedimentarias del Arco Cretácico, y rocas sedimentarias sinorogénicas del Campaniano superior al Paleoceno, que en conjunto yacen como un manto alóctono sobre las rocas carbonatadas del margen continental de Las Bahamas (Unidad Tectónico Estructural de Placetas). Los sedimentos postorogénicos del Eoceno medio-superior al Cuaternario, depositados en condiciones tectónicamente tranquilas, ocupan la mayor parte del territorio, son característicos de la formación

Cojímar, representada por margas y calizas interestratificadas (Iturralde, 2012).

Aunque la media anual de los recursos hídricos disponibles por habitantes en la provincia de Mayabeque alcanza la cifra de 1 850 m³, el estrés hídrico, calculado como la relación entre el volumen de extracción total de agua respecto a los recursos hídricos aprovechables, alcanza el 68,92%, lo cual se considera muy alto y demuestra que se está explotando más del 50% de los recursos almacenados en los embalses construidos y en los acuíferos, lo que indica sobreexplotación de los recursos hidráulicos si éstos no pueden ser renovados en el tiempo (González y Domínguez, 2019).

Esta situación, unida a los efectos del cambio climático que pronostica disminución en las precipitaciones, provocará menos recursos hídricos disponibles para las generaciones futuras. Todo ello hace imprescindible, no solo el desarrollo de obras hidráulicas para almacenar el agua, si no también vigilar y garantizar su aprovechamiento sostenible.

En el año 1973 fue construida la derivadora Pedroso en el cauce del río Mayabeque, que junto con el embalse Mampostón, forman el Complejo Hidráulico Pedroso – Mampostón, cuyo objetivo es almacenar el agua y enviarla hacia municipios

de la provincia vecina de Artemisa usando un canal magistral de más de 80 km. El área del embalse Mampostón es de 14,6 km² y es capaz de almacenar 150 millones de m³ de agua. Otra obra hidráulica de gran envergadura es el embalse Caunavaco con un área de 7,8 km², capaz de almacenar 80 millones de m³, construido en el año 1990 en la cuenca del Río San Agustín – Río San Juan, con un canal de 43 km que se une con el complejo Pedroso-Mampostón y con el canal Pedroso-Güira, permitiendo el trasvase de agua en la cuenca del río San Juan (Matanzas) hacia la capital.

Los embalses Canasí y Jaruco poseen un área de 42,5 km² y 43,7 km² y pueden almacenar un volumen total de agua de 58,4 millones de m³ y 28 millones de m³ respectivamente.

Estos embalses constituyen una fuente de agua dulce para el abasto de núcleos urbanos y son utilizados con frecuencia para el riego de cultivos, el abastecimiento de agua a las diferentes instalaciones ganaderas y la cría de peces, aspectos que contribuyen al desarrollo económico de la región. El estudio de la variación espacio-temporal del agua que almacenan es vital para tomar medidas oportunas que permitan una gestión integral sostenible de este recurso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación fueron utilizados los siguientes materiales:

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con una resolución espacial de 25 m obtenido de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

- Mapa Geológico a escala 1:100.000 del Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba (IGP, 2011).

- Imágenes satelitales Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI/TIRS) del año 2000 hasta el 2020 descargadas del sitio <https://earthexplorer.usgs.gov/> correspondiente al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

La teledetección es una técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre (Chuvioco, 1995).

Los sistemas de teledetección pueden operar en dos formas: utilizando sensores pasivos; cuando se limitan a recibir energía proveniente de un foco exterior a ellos, o sensores activos; cuando son capaces de emitir su propio haz de energía.

Los más empleados en teledetección son los sensores pasivos, siendo el sol la principal fuente

de energía electromagnética. Su fuerte radiación hace que sea recibida por otros cuerpos, los cuales, a su vez, la reflejan, absorben y transmiten.

La energía electromagnética emitida o reflejada por el objeto es captada por el sensor que posteriormente transmite esta energía, en forma electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos serán convertidos a imágenes digitales.

La energía radiante se puede describir en función de su longitud de onda o frecuencia ya que todos los cuerpos que emiten energía lo hacen en una sucesión de valores de longitud de onda en forma continua, emitiendo para una determinada longitud de onda una mayor cantidad de energía. Esta sucesión continua de valores de longitud de onda de composición similar es lo que se conoce como espectro electromagnético, en el que destacan las bandas espectrales siguientes: espectro visible (0,4 – 0,7 μm), infrarrojo próximo (0,7 – 1,3 μm), infrarrojo medio (1,3 – 8 μm), infrarrojo lejano (8 – 14 μm), microondas (a partir de 1 mm).

Las posibilidades de identificar los objetos a

partir de imágenes satelitales dependen de lo que se conoce como “firma espectral”, obtenida a partir del valor de la reflectancia en función de la longitud de onda para cada una de las bandas presentes en el sensor (Chuvieco, 1995; Rodríguez et al., 2022)

La respuesta espectral del agua depende principalmente de su pureza y de la presencia de partículas en suspensión.

El agua pura tiene excelentes propiedades en cuanto a transmisión de la radiación electromagnética en el espectro visible, con longitudes de onda entre 0,4 – 0,7 μm , y excelentes propiedades de absorción en el infrarrojo donde las longitudes de onda varían de 0,7 – 14 μm . En cambio, la reflectancia presenta un pico espectral en el verde que va reduciéndose hasta el infrarrojo. Esta falta de reflectividad en el infrarrojo es clave para diferenciar áreas de tierra y agua.

Índices espectrales en la detección de cuerpos de agua

Los índices espectrales son parámetros calculados a partir de expresiones matemáticas donde las principales variables son las bandas espectrales con valores de reflectividad y longitudes de onda distintas, permitiendo extraer información de interés en dependencia de las características particulares de los objetos.

En esta investigación, para la detección de los cuerpos de agua, fueron utilizados el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI) y el Índice de Extracción Automática de Agua con sombra (AWEI_{sh}) y sin sombra ((AWEI_{nsh})).

El índice MNDWI propuesto por Xu (2006) es una modificación del Índice Normalizado de Agua (NDWI) propuesto por McFeeters (1996) que consiste en emplear la banda del infrarrojo medio en lugar de la banda del infrarrojo cercano, en combinación con la banda del verde. Según el autor este cambio permite eliminar los ruidos creados por la vegetación y áreas de construcción. Se calcula a partir de la ecuación (1) para imágenes de Landsat 5 y a partir de la ecuación (2) para imágenes de Landsat 8:

$$MNDWI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5} \quad (1)$$

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR 1}{Green + SWIR 1} \quad (2)$$

Donde:

B2: banda espectral del color verde

B5: Banda espectral del infrarrojo medio

Green: banda espectral del color verde

SWIR 1: Banda espectral del infrarrojo medio

El índice AWEI_{sh} fue desarrollado por Feyisa et al. (2014) para mejorar la precisión en la extracción de los cuerpos de agua en presencia de sombras. El índice AWEI sin sombra (AWEI_{nsh}) fue también propuesto por Feyisa et al. (2014) con el objetivo de identificar áreas con agua eliminando la influencia de las sombras provocadas por zonas de construcción, elevaciones y techos altamente reflectantes en áreas urbanas.

Estos índices se determinan para imágenes Landsat 5 y 7 a partir de las ecuaciones (3) y (4), y empleando las ecuaciones (5) y (6) para imágenes Landsat 8:

$$AWEI_{sh} = B1 + 2,5(B2) - 1,5(B4 + B5) - 0,25(B7) \quad (3)$$

$$AWEI_{nsh} = 4(B2 - B5) - 0,25(B4) - 2,75(B7) \quad (4)$$

$$AWEI_{sh} = Blue + 2,5 (Green) - 1,5(NIR + SWIR 1) - 0,25(SWIR 2) \quad (5)$$

$$AWEI_{nsh} = 4(Green - SWIR 1) - 0,25(NIR) + 2,75(SWIR 2) \quad (6)$$

Donde:

B1: banda espectral del color azul

B2: banda espectral del color verde

B4: banda espectral del infrarrojo cercano

B5: banda espectral del infrarrojo medio

B7: banda espectral del infrarrojo lejano

SWIR 1: banda espectral del infrarrojo medio

SWIR 2: banda espectral del infrarrojo lejano

Blue: banda espectral del color azul

Green: banda espectral del color verde

Metodología de seguimiento del indicador 6.6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (ODS 6) consiste en velar porque toda la población en el mundo disponga de agua limpia y saneamiento. La meta 6.6 persigue proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua.

Dentro de los indicadores de la meta 6.6 de los ODS, el 6.6.1 se dirige específicamente a que los países monitoreen los cambios en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo. Este indicador requiere que los datos se recopilen en base a tres componentes: la extensión espacial de los ecosistemas relacionados con el agua, la cantidad y la calidad del agua que contienen.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para estudiar la variación espacio temporal de los ecosistemas relacionados con el agua para dar respuesta al indicador 6.6.1 de los ODS (ONU, 2020):

1. Establecer un período de referencia o “línea base”.
2. Promediar las observaciones anuales de la extensión de los embalses durante el período de referencia para definir la “línea base”.
3. Tomar otro período de observaciones de cinco años y promediar de manera similar al período de referencia, la extensión de cada embalse.
4. Determinar la variación porcentual del período objeto de estudio con relación al período de referencia utilizando la ecuación (7):

$$\Delta A = \frac{\beta - \gamma}{\beta} * 100 \quad (7)$$

Donde:

ΔA : variación porcentual de la extensión del embalse en el período analizado.

β : promedio de la extensión del embalse en el período de referencia

γ : promedio de la extensión del embalse en el quinquenio analizado.

La variación porcentual de la extensión del cuerpo de agua en el período analizado permite conocer el sentido de cambio del ecosistema, donde los valores positivos indican una disminución de su extensión y los negativos un aumento.

Aplicación de la metodología en el área de estudio

Como punto de partida se realizó al análisis del Modelo Digital de Elevaciones con una

resolución espacial de 25 m obtenido de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), del que fue elaborado el mapa de pendientes y redes de drenaje del área de estudio empleando el Sistema de Información Geográfico QGIS versión 3.22.

A partir del mapa de pendientes se ratificó que los embalses se ubican en zonas donde los valores de pendiente son mínimos rodeados por valores máximos.

Se realizó, además, un mapa de zonas favorables para la acumulación de agua, identificadas como aquellas donde la pendiente topográfica presenta valores menores que 10, confirmando que las áreas donde se encuentran los cuerpos de agua se localizan en estas zonas.

Las imágenes satelitales Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI/TIRS) del año 2000 hasta el 2020, con una resolución espacial de 30 X 30 metros, se descargaron del sitio <https://earthexplorer.usgs.gov/>, seleccionando aquellas con bajo nivel de nubosidad.

Fueron utilizadas un total de 97 imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8, correspondientes a Landsat Collection 2 Nivel 2 (C2L2), las cuales están dadas en reflectancia de la superficie a las que ya le han sido realizadas las correcciones atmosféricas y radiométricas. Todo el procesamiento de las imágenes satelitales se realizó utilizando el Sistema de Información Geográfico QGIS versión 3.22.

Como período de referencia o “línea base” se estableció el quinquenio 2000-2004.

Para la delimitación de los cuerpos de agua fueron calculados los índices espectrales MNDWI, $AWEI_{nsh}$ y $AWEI_{sh}$, los que presentan valores mayores y menores que cero. En la medida que estos valores se aproximan a cero indican un incremento de la vegetación y de la presencia de agua, estando los valores positivos asociados a zonas donde la presencia de agua es creciente. El índice $AWEI_{nsh}$ presentó menor poder resolutivo ya que la zona de estudio no se caracteriza por presentar grandes elevaciones ni extensas zonas urbanas, mostrando los índices MNDWI y $AWEI_{sh}$ mayor capacidad de delimitar los bordes de los embalses bajo estudio.

Para ambos índices se estableció un valor umbral, tomando los valores mayores que cero para extraer los cuerpos de agua. Se elaboró una imagen booleana, asignando 1 a aquellos píxeles donde estos índices son mayores que el valor umbral (presencia de agua) y valor cero para aquellos píxeles que presentan valores por debajo

del valor umbral (ausencia de agua).

Esta imagen booleana fue convertida a formato vectorial quedando definidos los polígonos que resaltan las áreas con presencia y ausencia de agua. Finalmente se obtuvo un

archivo en formato *shapefile* que delimita los cuerpos de agua de interés. En la figura 2 se muestra la imagen satelital Landsat 8 en color verdadero donde aparecen los embalses Jaruco, Canasí, Caunavaco y Mampostón.

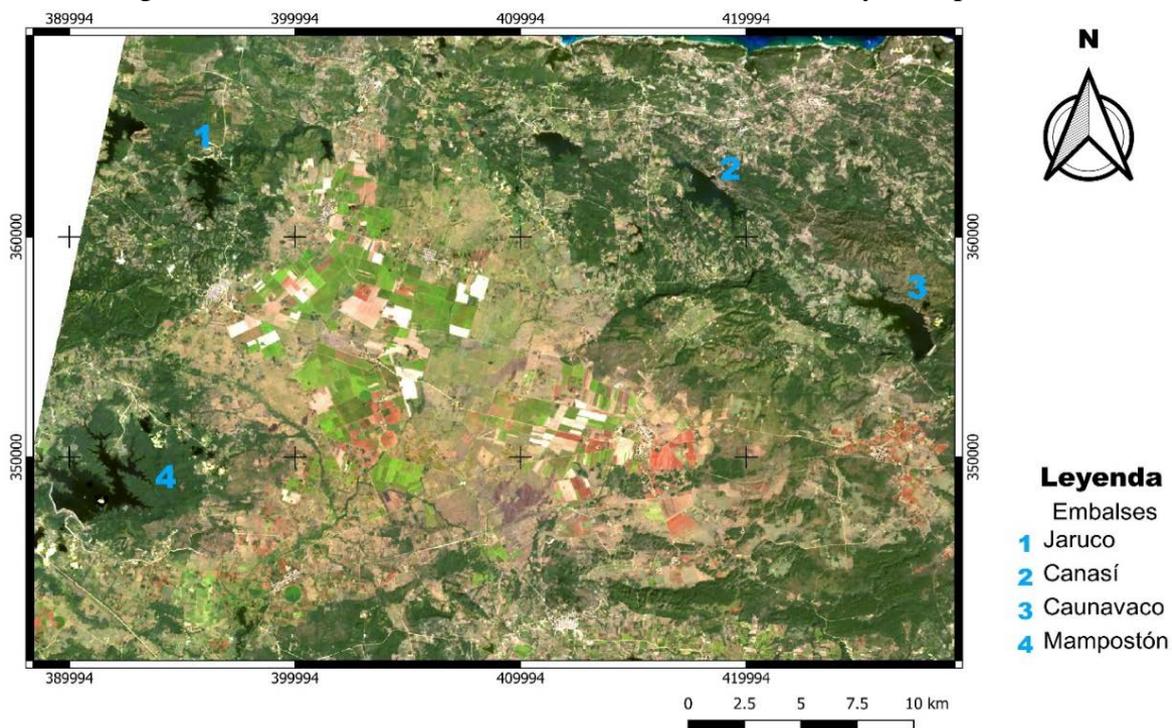


Figura 2 - Imagen satelital en color verdadero mostrando los embalses Jaruco, Canasí, Caunavaco y Mampostón.

Las figuras 3 y 4 presentan las imágenes booleanas del índice MNDWI y $AWEI_{sh}$. Las figuras 5 y 6 son el resultado de la transformación de las imágenes booleanas en formato vectorial *shapefile*, donde quedan delimitados los embalses estudiados.

Este procedimiento se aplicó a todas las imágenes disponibles, y para cada embalse se calculó su área mínima, máxima y promedio, para cada año y para cada quinquenio, en el período comprendido entre los años 2000 – 2020.

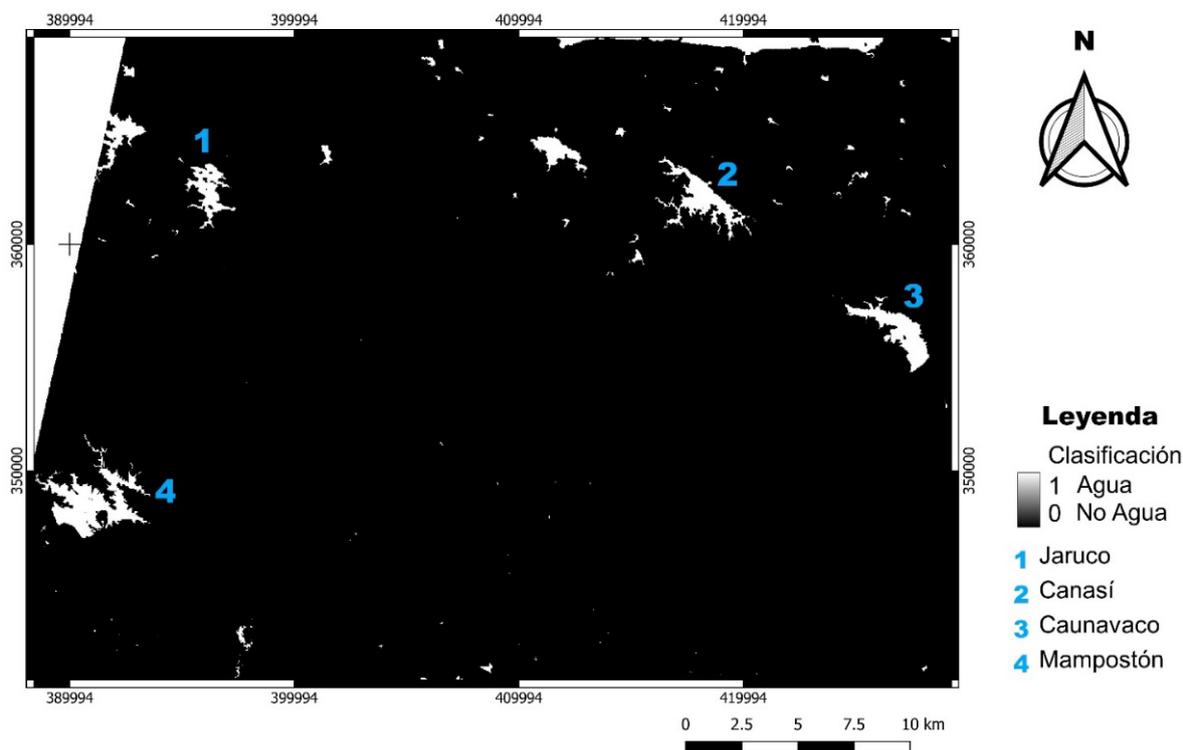


Figura 3 - Imagen booleana del índice MNDWI.

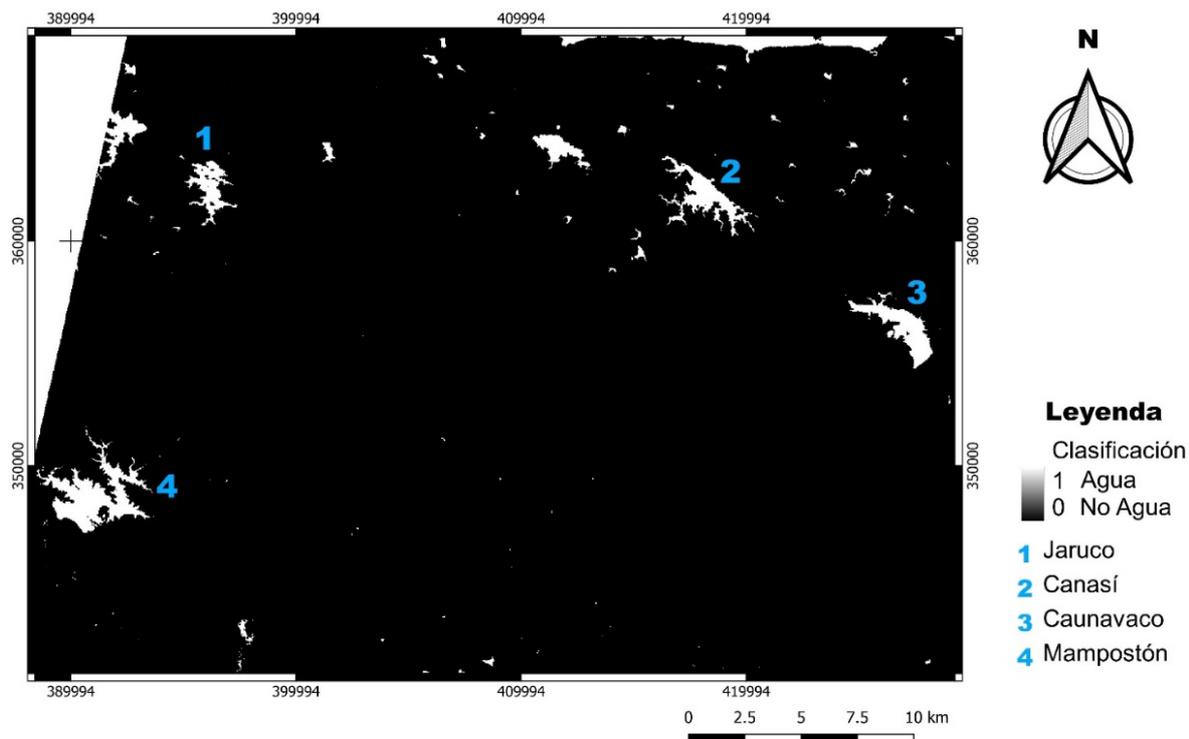


Figura 4 - Imagen booleana del índice $AWEI_{sh}$

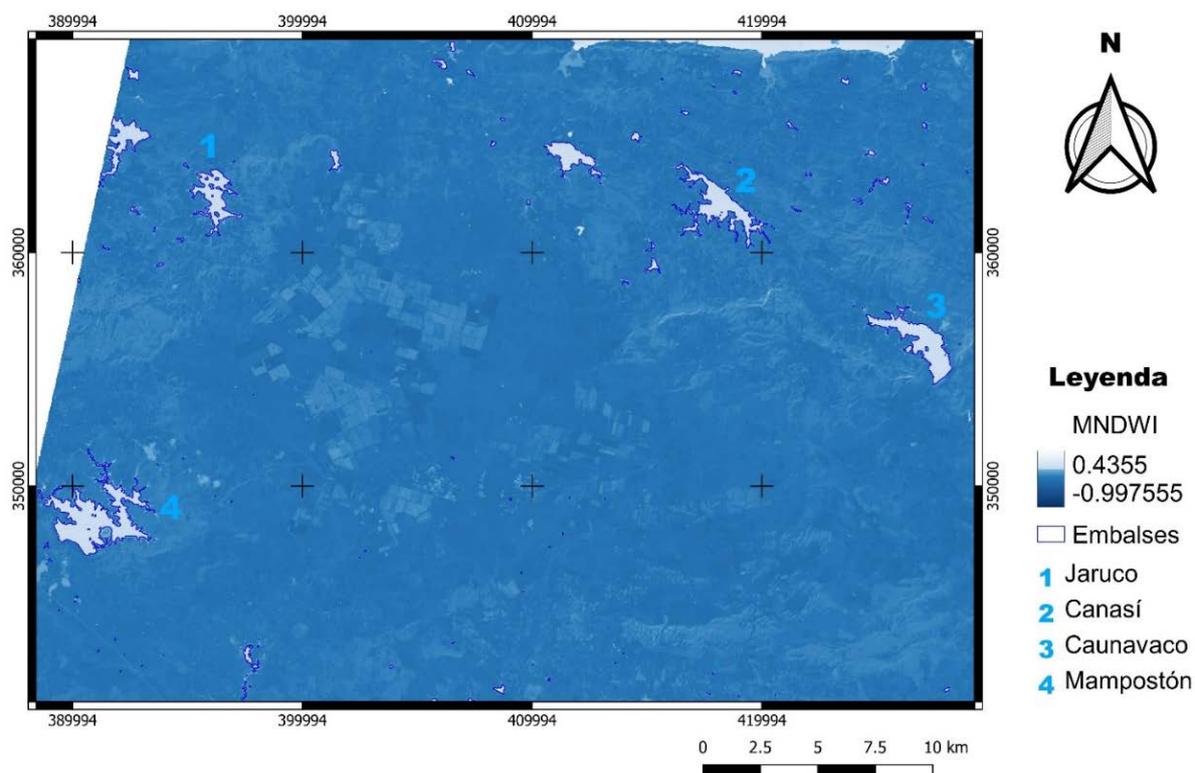


Figura 5 - Cuerpos de agua delimitados según el índice MNDWI donde se identifican los embalses Jaruco, Canasí, Caunavaco y Mampostón.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 7 muestra el área promedio anual de los embalses Canasí, Caunavaco, Jaruco y Mampostón en el período comprendido del 2000 al 2020.

Se destaca que todos los embalses estudiados presentan tendencia a la disminución de sus áreas

en el período analizado, siendo este comportamiento más acentuado en los embalses Mampostón y Canasí. El embalse Caunavaco presenta tendencia a la recuperación a partir del año 2016, Jaruco es el que presenta menor variación en el tiempo.

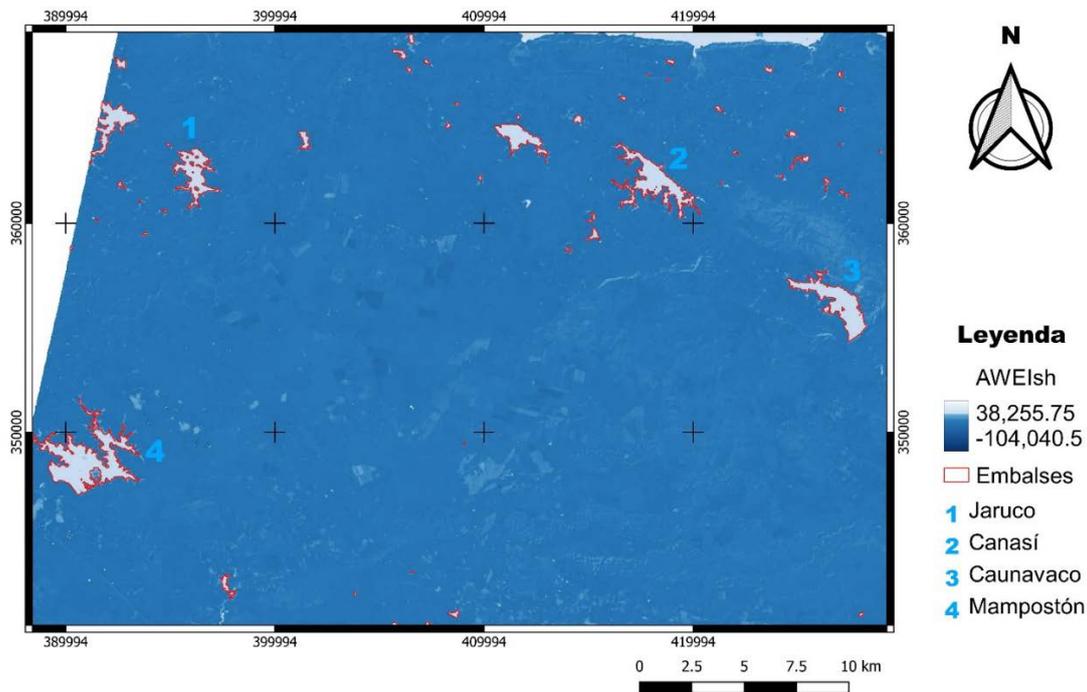


Figura 6 - Cuerpos de agua delimitados según el índice AWEI_{sh} donde se delimitan los embasements Jaruco, Canasí, Caunavaco y Mampostón.

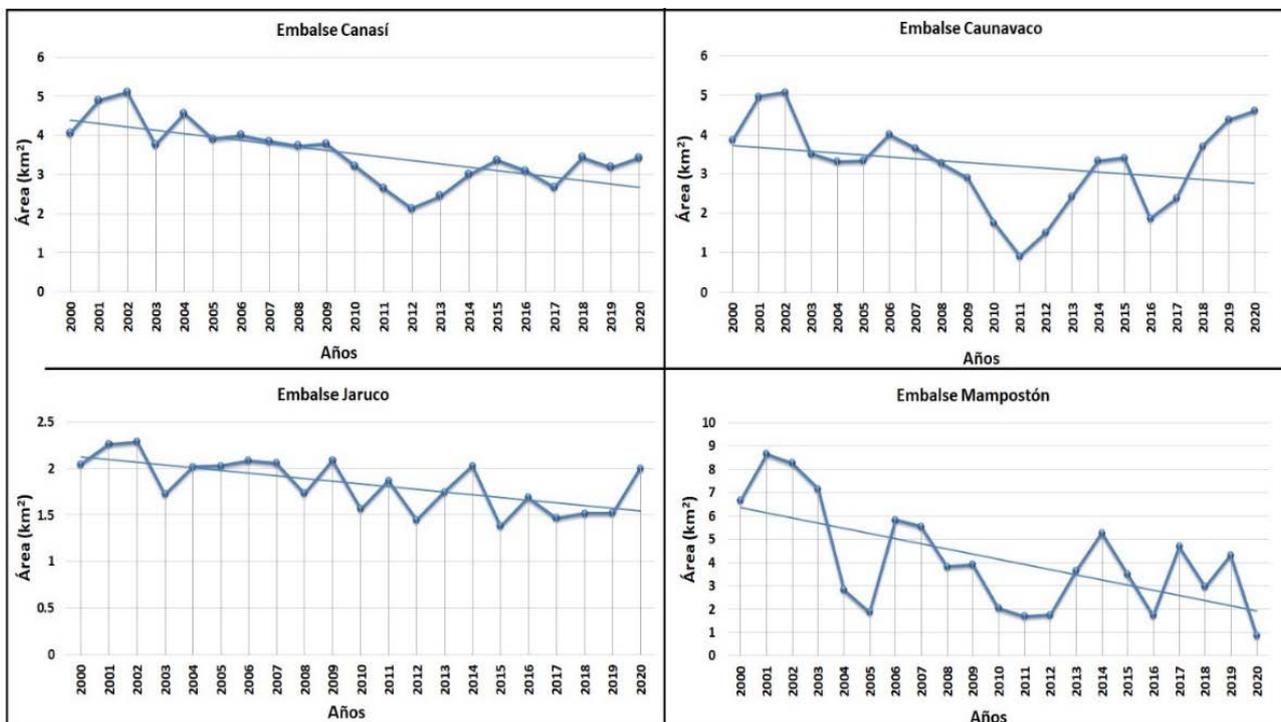


Figura 7 - Área promedio de los embasements del año 2000 a 2020.

El embalse Canasí refleja un comportamiento creciente en los tres primeros años del período de línea base (2000-2002) y en los dos últimos años comienza a disminuir (2003-2004).

El quinquenio posterior (2005-2009) se comporta de forma homogénea pero con valores de área inferiores al período de referencia. En el año 2010 comienza a disminuir significativamente hasta el año 2014; siendo este quinquenio donde el embalse se ha visto más afectado.

Es significativo el año 2012 con la menor área de este embalse en todo el período. El último quinquenio presenta un comportamiento relativamente constante que no alcanza los niveles del período tomado como línea base.

El embalse Caunavaco presenta una constante disminución de su área que no se detiene hasta el año 2011 en que inicia una tendencia a la recuperación.

El comportamiento del embalse Jaruco se

muestra más homogéneo aunque también con ligera tendencia a la disminución del agua almacenada.

El área del embalse Mampostón se caracteriza por presentar una tendencia negativa muy marcada hasta el año 2005, año en que comienza a recuperarse pero con comportamientos cíclicos y con niveles inferiores a los niveles de referencia, presentando el mínimo absoluto en el año 2020.

La figura 8 muestra la variación espacio-temporal del área promedio de los embalses en los quinquenios 2005-2009, 2010-2014 y 2015-2019 con respecto al período de línea base 2000-2004.

El año 2020 no se incluye porque según la metodología del indicador 6.6.1 este análisis se

realiza para períodos de cinco años.

Todos los embalses analizados disminuyen su extensión en cada quinquenio con respecto a la línea base, a excepción del embalse Caunavaco que para el quinquenio 2015-2019 aumenta en 11,35 %.

El quinquenio 2005-2009 posee la menor afectación en la disminución del agua almacenada para todos los embalses.

Es significativo que en el quinquenio 2015-2019, el área del embalse Mampostón presente una disminución del 87,10% con respecto a la línea base, reflejando la sobreexplotación que sufrió en este período.

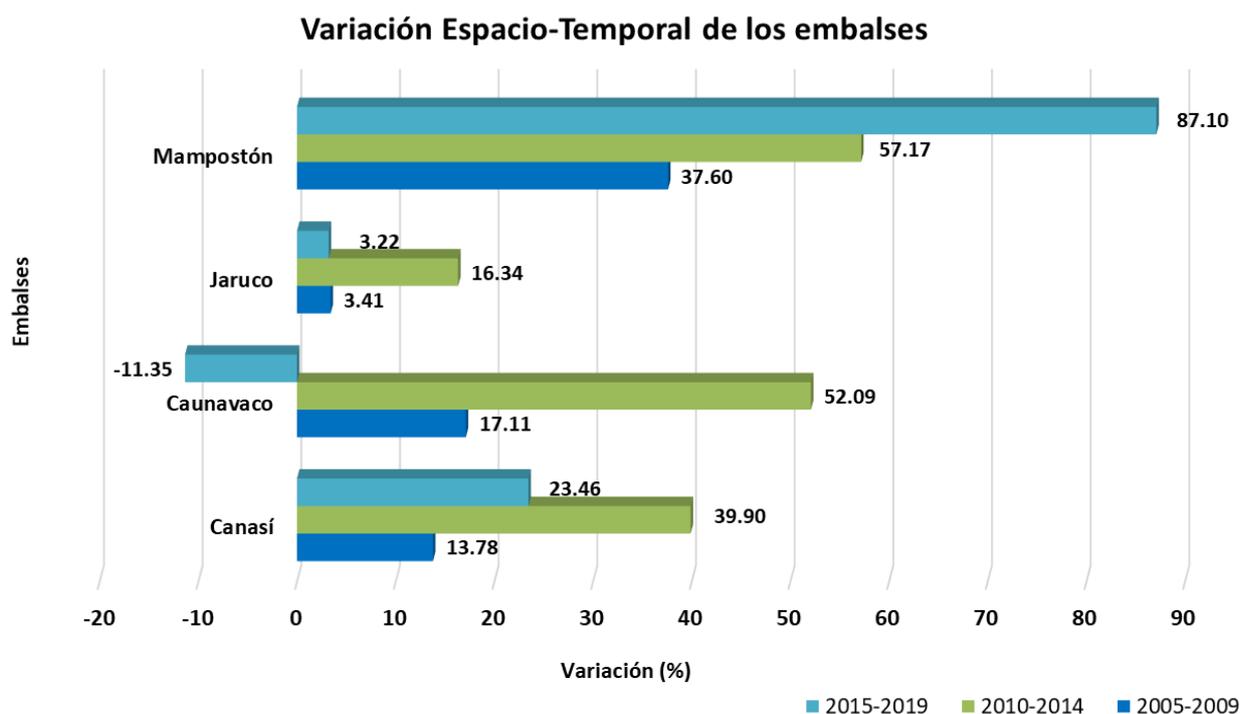


Figura 8 - Variación espacio-temporal del área de los embalses en los quinquenios analizados.

CONCLUSIONES

La investigación realizada permitió identificar que todos los embalses estudiados en la provincia Mayabeque muestran tendencia a la disminución de la cantidad de agua almacenada en el período comprendido entre los años 2000 al 2020, y que el área promedio de estos ecosistemas acuáticos ha disminuido en cada quinquenio con respecto a la línea base definida para el período 2000 – 2004.

Estos resultados se corresponden con el comportamiento del clima en Cuba durante las últimas décadas, donde se reconoce la tendencia decreciente de la media histórica nacional de las precipitaciones y el sostenido incremento de la

temperatura. Se corresponde también con las crecientes demandas de agua para abasto a la población, los servicios, el desarrollo agrícola e industrial.

Se ha confirmado la utilidad de los índices espectrales MNDWI y AWEI_{sh} para la delimitación de los cuerpos de agua y para el estudio de su variación espacio-temporal.

Se recomienda el uso sistemático de esta metodología para brindar, en tiempo real, valiosa información a los sistemas de alerta temprana y contribuir a la toma de decisiones informadas que garanticen la gestión integral y sostenible del agua.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, R. & PÉREZ, S. Cartografía temática de la cobertura de manglares mediante imágenes satelitales Landsat-7 y el ENVI 3.5, 2004. **Convención Trópico 2004**. En: II CONGRESO DE GEOGRAFÍA TROPICAL, LA HABANA. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://repositorio.geotech.cu/xmlui/bitstream/handle/1234/2199/Cartograf%25C3%25ADa%2520em%25C3%25A1tica%2520de%2520la%2520cobertura%2520de%2520manglares%2520mediante%2520im%25C3%25A1genes%2520satelital.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&ved=2ahUKEwid2OHZsO2EAXISTABHRHfDgMQFnOECBgQAQ&usq=AOvVaw0F1VpuloB_mi9whLiI1ssd.
- ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR, ANPP. Ley No. 124 de las aguas terrestres. **Gaceta Oficial No. 51 Extraordinaria**. Cuba, 63p., 2017.
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Segunda Edición, 449 p., 1995
- DENIS, D.; CURBELO, E.A.; MADRIGAL, L.J.; PÉREZ, R.D. Variación espacio-temporal de la respuesta espectral en manglares de La Habana, Cuba, evaluada con sensores remotos. **Revista de Biología Tropical**, v. 68, n. 1, p. 321-335, 2020.
- DÍAZ, J. A. El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, v. 34, n. 2, p. 46-59, 2018.
- FEYISA, G.; MEILBY, H.; FENSHOLT, R.; PROUD, S. Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 23–35, 2014.
- FONSECA, C.; HERNÁNDEZ, D.; ALPÍZAR, M.; GONZÁLEZ, I.; GIL, L.; CUTIÉ, V.; MARTÍNEZ, M.; BARCÍA, S.; VÁZQUEZ, R.; HERNÁNDEZ, M.; VELÁZQUEZ, B.; PÉREZ, R.; VALDERÁ, N. Estado del clima en Cuba 2020. Resumen ampliado. **Revista Cubana de Meteorología**, v. 27, n. 2, 2021. <http://accion.uccfd.cu>.
- GONZÁLEZ, J.I. & DOMÍNGUEZ, H.N. Distribución espacial de los recursos hídricos en Cuba. Proyección. **Estudios geográficos y de ordenamiento territorial**, v. 13, n. 26, p. 136 – 156, 2019. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/proyeccion/article/view/2842>.
- INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA, IGP. **Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000**. La Habana, Servicio Geológico de Cuba, 2011.
- ITURRALDE, M. **Compendio de Geología de Cuba y el Caribe**. Segunda edición. CITMATEL, La Habana, 230 p., 2012.
- KE, Z.; XIAOQING, W.; YUANWEI Q.; PEIPEI, Y. Comparison of surface water extraction performances of different classic water indices using OLI and TM imageries in different situations. **Geo-spatial Information Science**, v. 18, n. 1, p. 32-42, 2015.
- KHALID, H.; KHALIL, R.; QURESHI, M. Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 24, n. 3, p. 619-634, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.003>.
- KOVAC, F.S., MIEZA, Y.R.; HARÁN. Monitoreo de agua superficial en La Pampa por medio de imágenes satelitales. En: PRIMER CONGRESO PAMPEANO DEL AGUA, SANTA ROSA, LA PAMPA, Argentina, 2005, p. 263-270. https://www.researchgate.net/publication/334230885_Monitoreo_de_agua_superficial_en_La_Pampa_por_medio_de_imagenes_satelitales/link/5d1dfde592851cf44064e6e8/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19.
- MAKAKA, R.; MISI, S.; MASOCHA, M.; KIMWAGA, R. Spatial and Temporal Variation of Selected Water Quality Parameters in the Tanzanian Side of Lake Victoria. **Tanzania Journal of Engineering and Technology**, v. 40, n. 2, p. 1-23, 2021.
- MCFEETERS, S. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.
- MIRAVET, B.; GARCÍA, A.; MEDEROS, M. Evolución espacio-temporal de la Laguna Ariguanabo, provincia Artemisa, Cuba (período 1700-2013). **Ciencias de la Tierra y el Espacio**, v. 16, n. 1, p. 97-106, 2014.
- ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS, ONU. 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, 39 p. 2020. https://files.habitatseven.com/unwater/SDG-indicator-661-methodology_Spanish.pdf.
- ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS, ONU. Progresos en los ecosistemas relacionados con el agua. Prueba piloto de la metodología de monitoreo y primeras constataciones sobre el indicador 6.6.1 de los ODS, 68 p., 2018. Disponible en: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2018/12/SDG6_Indicador_Report_661_Progress-on-Water-related-Ecosystems_SPANISH_2018.pdf.
- RODRÍGUEZ, W.; ESCARTÍN, E.; FERNÁNDEZ, H.; VALCARCE, R. Estado actual del empleo de la teledetección para el estudio de las variaciones espaciales y temporales de los ecosistemas relacionados con el agua. Primera edición. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. Departamento de Geociencias, 2022. https://www.researchgate.net/publication/364848711_ESTADO_ACTUAL_DEL_EMPLEO_DE_LA_TELEDETECCION_PARA_EL_ESTUDIO_DE_LAS_VARIACIONES_ESPACIALES_Y_TEMPORALES_DE_LOS_ECOSISTEMAS_RELACIONADOS_CON_EL_AGUA.
- SHARMA, K.; SINGH, S.; KALLA, A. Role of satellite remote sensing for monitoring of surface water resources in an arid environment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 34, n. 5, p. 531-537, 1989.
- XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.

Submetido em 24 de março de 2024

Aceito para publicação em 16 de outubro de 2024