



# Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba

D. D. Cruz Flores<sup>1,\*</sup>, E. A. Curbelo Benítez<sup>2</sup>, Y. Ferrer-Sánchez<sup>3</sup>, D. D. Ávila<sup>2</sup>

(1) Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC), Universidad Autónoma de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México.

(2) Departamento de Biología Animal y Humana, Facultad de Biología, Universidad de la Habana, Cuba. calle 25 entre J e I, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba.

(3) Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Av. Quito km. 1 1/2 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas, Quevedo-Los Ríos, Ecuador.

\* Autor de correspondencia: D.D. Cruz Flores [[daryldavidcf@gmail.com](mailto:daryldavidcf@gmail.com)]

> Recibido el 04 de noviembre de 2019 - Aceptado el 16 de enero de 2020

**Cruz Flores, D.D., Curbelo Benítez, E.A., Ferrer-Sánchez, Y., Ávila, D.D. 2020. Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Ecosistemas* 29(1):1885. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>**

Al ser la vegetación uno de los principales elementos de los ecosistemas terrestres, e indicadora de diferentes procesos biofísicos, es importante contar con herramientas adecuadas para su monitoreo. Los índices espectrales de vegetación han sido una de las formas más efectivas de evaluar las propiedades de la cobertura vegetal a grandes escalas y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) ha sido uno de los más empleados. Nuestro objetivo fue describir las diferencias espaciales y temporales del NDVI en Cuba, según tipos de vegetación o cobertura del suelo. El análisis temporal se dividió en plurianual y anual. Los valores del índice se muestrearon mediante 10 000 puntos aleatorios, clasificados según el uso del suelo, la formación de plantas y la altitud. Se tomaron muestras de las 23 áreas naturales protegidas con mayor representación de área terrestre. El índice tuvo un promedio global de  $0.702 \pm 0.198$ , con un 71% de los valores superiores a 0.60. Las áreas de usos antropogénicos mostraron valores de índice 10% más bajos que la vegetación natural. Las formaciones boscosas tuvieron valores superiores a 0.8, excepto los manglares. No se detectó asociación significativa entre la altitud y los valores de NDVI. Las áreas protegidas mostraron diferentes valores de índice, en relación con su gestión y categoría de extensión. Las coberturas utilizadas pueden servir de base para otros estudios sobre la distribución de vegetación y fauna cubana.

**Palabras clave:** formaciones vegetales; índices espectrales de vegetación; NDVI; sensores remotos

**Cruz Flores, D.D., Curbelo Benítez, E.A., Ferrer-Sánchez, Y., Ávila, D.D. 2020. Spatial and temporal variations in Normalized Difference Vegetation Index in Cuba. *Ecosistemas* 29(1):1885. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>**

Vegetation spectral indexes have been one of the most effective ways to assess the properties of plant cover and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been one of the most used. Our objective was to describe spatial and temporal differences of the NDVI in Cuba, according to types of vegetation and land use. The temporal analysis was divided into multiannual and annual. The index values were sampled using 10 000 random points, classified according to land use, plant formation, and altitude. Samples were taken from 23 protected natural areas, which presented the largest area of terrestrial surface. The index had a global average of  $0.702 \pm 0.198$ , with 71% of the values above 0.60. The areas of anthropogenic uses showed index values 10% lower than natural vegetation. The forest formations had values greater than 0.8, except for mangroves. Protected areas showed different index values, concerning their management and extension category. The covers used can serve as a basis for studies on the distribution of vegetation and fauna in Cuba.

**Key words:** vegetation types; spectral vegetation indexes; NDVI; remote sensing

## Introducción

La vegetación constituye uno de los principales elementos de los ecosistemas terrestres y es un importante indicador para evaluar diferentes procesos biofísicos como, por ejemplo, los fenómenos relacionados a la pérdida de biodiversidad, desertificación, erosión del suelo e interacción vegetación-clima. La correcta gestión de la vegetación como recurso natural estratégico requiere un conocimiento exhaustivo y contar con herramientas adecuadas para su monitoreo. Esto es importante, no sólo para mejorar la gestión, sino porque dicha información puede actuar como punto de partida para evaluar su influencia sobre otros recursos (Bonet 2004).

Las formaciones vegetales responden de manera diferente a los procesos de cambio ambiental y a las presiones antrópicas; por tanto, el reconocimiento de sus características espaciales es de primera importancia en la planificación de programas de seguimiento y políticas de conservación (Klijn 1994). En este sentido, la teledetección y sobre todo los datos de satélites multiespectrales, han sido utilizados como valiosas herramientas, determinantes a la hora de evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales (Gonzaga 2015). Los datos adquiridos por teledetección comprenden tres tipos de información: espacial, que representa la organización en el espacio de los elementos; espectral, que caracteriza la naturaleza de la superficie; y temporal, que

permite la detección de los cambios temporales en una determinada zona (Sacristán 2006).

El análisis espectral de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices que se basan en el contraste entre las bandas del espectro (Richards y Jia 2006), y que se denominan índices espectrales de vegetación. Estos se calculan a partir de la combinación matemática de dos o más bandas de una imagen satelital multispectral y tienden a presentar, de forma más nítida, las características de la vegetación. De igual forma, facilitan su aislamiento de otras cubiertas y la evaluación de su estado. Los índices y productos de vegetación que derivan de estas técnicas de percepción remota, han sido una de las formas más efectivas de evaluar los cambios históricos en las propiedades de la cobertura vegetal a gran escala (Turner et al. 2003; Fairbanks y McGwire 2004; Feeley et al. 2005) y para estudios de los cambios espacio-temporales de la vegetación (Yebra y Chuvieco 2008).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Rouse et al. 1974) es el índice espectral más comúnmente utilizado para la descripción de la salud y otros parámetros de la vegetación (Fairbanks y McGwire 2004; Tun-Dzul et al. 2008; Pettorelli 2013). Su fórmula normaliza la diferencia entre la reflectancia en el rojo (centrada en 670 nm) y en el infrarrojo cercano (centrada en 860 nm), que son las regiones de mayor reflectancia y absorción de la clorofila, lo cual lo hace aplicable en una amplia gama de condiciones. Sus valores varían de -1 a 1, correspondiendo los valores negativos al agua y los valores cercanos a cero al suelo desnudo, nubes, nieve o concreto (Neigh et al. 2008). El rango común para la vegetación se encuentra entre 0.2 a 0.8 (por encima del cual se tiende a saturar en bosques tropicales). Este índice, al representar la actividad fotosintética, está asociado con la biomasa, la productividad primaria neta, el secuestro de carbono, el estrés hídrico de la vegetación y la biodiversidad de los ecosistemas (Nagendra et al. 2013; Pereira et al. 2013), así como con las variables del clima, particularmente las precipitaciones, a escala global (Del Grosso et al. 2008) y regional (Gilmanov et al. 2005; Hermance et al. 2015). Por sus propiedades se ha empleado en el seguimiento del efecto de los cambios climáticos y otros procesos antropogénicos sobre los ecosistemas naturales (Pettorelli et al. 2012; Willis 2015; Gillespie et al. 2018).

En Cuba pocas investigaciones han aprovechado las ventajas que ofrecen las técnicas de percepción remota y los índices de vegetación para caracterizar la dinámica de las formaciones vegetales, los cambios en la cobertura de vegetación y el impacto del cambio climático (ej.: Cerdeira-Estrada et al. 2008; Morejón et al. 2010; Denis 2015; Ponvert-Delisle 2016; Hernández y Cruz 2016; Cobos et al. 2016). El único antecedente publicado que evalúa el NDVI en Cuba es el de Cobos et al. (2016) quienes analizaron los cambios temporales de este índice de vegetación entre el 2003 y 2013. Sin embargo, este trabajo estuvo limitado por el grano grueso (500 m) de productos acumulados del sensor MODIS y por no diferenciar los tipos de coberturas, empleando 1000 puntos aleatorios, de los cuales solo se filtraron los correspondientes a cuerpos de agua. Por esta razón, sus estimados de NDVI incluyeron la variabilidad asociada a los ecosistemas antrópicos y presentaron mezclados los valores de ecosistemas naturales y alterados (que comprenden cerca del 74% de la superficie de Cuba). Este procedimiento limita la aplicabilidad del resultado en trabajos conservacionistas o de manejo, y resultó en valores muy bajos del índice, con valores medios estimados para los meses de febrero de  $0.18 \pm 0.01$  (DE) (mín. 0.001; máx. 0.29) y para el mes de agosto de  $0.22 \pm 0.003$  (DE) (mín. 0.002 - máx. 0.29). Este trabajo, sin embargo, tiene el valor de ser el primer antecedente que, a nivel nacional, emplea productos espectrales satelitales con orientación conservacionista.

Este tipo de información espectral es muy importante en el estudio de la vegetación y la toma de decisiones de gestión y manejo de las zonas con vegetación, aunque no se ha descrito en Cuba. El presente trabajo parte de la hipótesis de que, dadas las caracte-

terísticas geoclimáticas del país y el patrón irregular de usos del suelo a lo largo de la isla, el NDVI debe presentar una alta variabilidad espacial y una relativa estabilidad temporal en sus ciclos de variación anual, por encima de los cuales aún son distinguibles los ecosistemas naturales de los antrópicos. Para someter a prueba esta hipótesis, el objetivo del presente trabajo es la descripción de las variaciones espaciales y temporales en el NDVI en Cuba, según los tipos de vegetación o cobertura de la tierra. Como producto adicional, se presenta un mapa de este índice actualizado y estandarizado, de resolución media (30 m), que pueda servir de base para futuras aplicaciones.

## Materiales y métodos

### Análisis de la variación temporal del índice

El análisis temporal se hizo a dos niveles: anual e interanual. Para el análisis anual se descargaron composiciones mensuales del producto *Global Land NDVI Collection* a 300 m, que es una síntesis de 10 días derivada de los datos del *Top of Canopy PROBA-V*, satélite del *Copernico Global Land Service* (Dierckx 2014), a lo largo del año 2017. Este producto se obtiene por el método de composición de máximos valores por pixel, propuesto por Holben (1986) y fue calibrado usando la ecuación  $PV = (ND - offset) / scale$  con los valores especificados para el NDVI (20 y 250, respectivamente), que dan un rango de valores físicos entre 0.08 y 0.92 (Smets et al. 2016). Los valores negativos fueron excluidos del análisis dado que son muy poco probables en zonas con vegetación.

La variación histórica se evaluó por medio de composiciones anuales medias de imágenes obtenidas entre el 1 de febrero y el 31 de mayo de cada año en los periodos 1985-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005, 2006-2010, 2011-2015 y 2016-2018. Los mapas individuales fueron obtenidos en la plataforma *Climate Engine* (<http://ClimateEngine.org>) (Huntington et al. 2017). *Climate Engine* utiliza la plataforma paralela de computación en la nube de Google, *Google Earth Engine* (Gorelick et al. 2017), para permitir a los usuarios procesar, visualizar, descargar y compartir diversos conjuntos de datos, productos de clima y sensores remotos globales y regionales (por ejemplo, mapas de anomalías y series temporales) en tiempo real (Huntington et al. 2017).

En ArcGis 10.1 (Esri Inc., 2012) se generaron 10 000 puntos aleatorios, separados a más de 300 m entre ellos, que se clasificaron en puntos sobre zonas antrópicas y sobre vegetación natural o seminatural (secundaria). Los de zonas antrópicas se clasificaron, además, según el tipo de uso del suelo en: cultivos de tabaco, pastos y forrajes, caña de azúcar, arroceras, cultivos varios y zonas urbanas (pueblos o ciudades). Los puntos sobre zonas naturales fueron clasificados según las principales formaciones vegetales: bosques secundarios (BS), bosques semicaducifolios (BSC), bosques siempreverdes (BSV), pluvisilvas (PL), manglares (BM), Cuabales (CU), Herbazales de ciénaga (HC), Matorrales secundarios (MS), Matorrales xeromorfo subespinosos (MXS) y Pinares (Pi). Estas clasificaciones se realizaron utilizando los mapas digitalizados a nivel de país obtenidos por Estrada et al. (2013). Una descripción detallada de cada una de estas formaciones se puede encontrar en Capote y Berazaín (1984).

### Análisis de la variación espacial

Para este análisis se obtuvo un mapa del NDVI mediante 13 imágenes satelitales del *Landsat 8*, obtenidas por el sensor OLI (*Operational Land Imager*) (Apéndice 1). Las imágenes fueron adquiridas del USGS (*United State Geological Survey*) / *EROS Data Center Glovis* (*Global Visualization Viewer*) (<https://glovis.usgs.gov/>), las cuales ya se encontraban radiométrica y geométricamente corregidas (L1Gt / L1T) (Zanter 2004). Las imágenes se filtraron en un rango de 0-20% de cobertura de nubes, entre los meses febrero-mayo del año 2017 y se seleccionaron las de mejor calidad, lo más cercanas en fecha de adquisición que fue posible. Se excluyeron los escenarios 13-44 y 13-46 porque solo cubren, tangencialmente, algunos cayos del territorio nacional.

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó en el programa ENVI 5.1 (*Exelis Visual Information Solutions 2013*) siguiendo el protocolo de trabajo representado en la **Figura 1**. Las imágenes originales fueron calibradas radiométricamente llevando sus valores digitales a unidades físicas de radiancia ( $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ ), y empleando para ello los valores de sesgos (*Bias*) y ganancias (*Gain*) que aparecían en los metadatos de cada imagen. Se realizó una corrección atmosférica inicial rápida por sustracción de cuerpo oscuro (*Dark Subtraction*) para disminuir las diferencias entre imágenes por efectos de la atmósfera o la iluminación. Posteriormente, se realizó la corrección FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), para reducir los efectos atmosféricos, y con las imágenes resultantes se calculó el NDVI.

Los escenarios individuales fueron filtrados con una máscara que eliminó los valores aberrantes del índice que respondían, mayormente, a la presencia de nubes aisladas, sus sombras y a cuerpos de agua. El territorio emergido de Cuba fue recortado, eliminando la parte marina y los cayos, que por los efectos de su tamaño relativamente pequeño y del mar adyacente, pueden ser más susceptibles a distorsiones espectrales. Los escenarios finales fueron unidos en un mismo mosaico nacional, para lo cual se empleó un suavizado de los bordes y el apareamiento de histograma global, de manera que las diferencias entre escenarios fuera mínima.

Los mismos puntos generados en el análisis temporal fueron empleados para extraer los valores del índice calculado. Además, fue extraída para cada punto la información referente a la altitud sobre el nivel del mar, obtenido con un modelo digital de elevación y las categorías de usos de suelo y formación vegetal natural comentadas previamente.

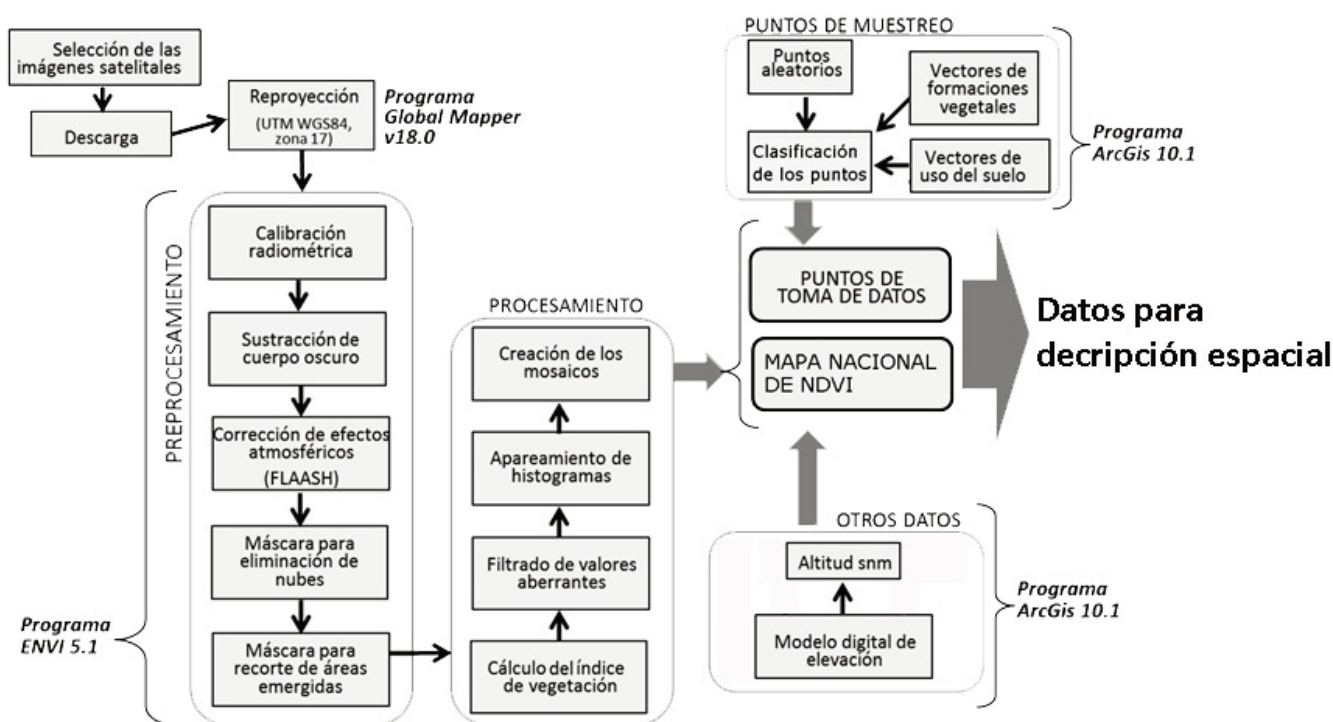
### Análisis de los datos

Los datos de los 10 000 puntos originales fueron filtrados y se eliminaron todos los valores extremos que representasen *outliers* en las curvas lognormales: como resultado la muestra se redujo a 9909 puntos. Para el análisis mensual solo se incluyeron aquellos puntos en los cuales la serie temporal estuviese completa, con lo cual se redujo la muestra de puntos a 2263.

Los valores del índice se describieron a partir del promedio (como estadístico de tendencia central) y de la desviación estándar (como medida de variabilidad) para cada tipo de vegetación y uso del suelo. En la mayoría de las figuras, sin embargo, se representaron los intervalos de confianza y el rango, en lugar de la desviación típica dado que estas últimas al ser influenciadas por el tamaño de muestra tienden a dar una imagen de precisión no realista en distribuciones de colas tan largas como las que aparecen en este tipo de datos. Además de los estadísticos de resumen se graficaron los histogramas de frecuencias, que caracterizan mejor la forma específica de las distribuciones. Solo se emplearon pruebas estadísticas de significación de hipótesis nulas en los casos en que las tendencias gráficas no eran evidentes.

Como los índices espectrales pueden variar en función de varios factores relacionados al tipo de sensor que los obtiene y al preprocesamiento que reciban las imágenes, el primer análisis fue la comparación global de los índices entre las diferentes fuentes de datos empleadas en este trabajo. Para esto se extrajeron 571 puntos del escenario de la ciénaga de Zapata (se seleccionó dicho escenario por la calidad de las imágenes) y se compararon los valores del índice obtenidos mediante: el escenario original del *Landsat* con correcciones atmosféricas, el producto del *Climate Engine*, *Proba-V*, el mosaico nacional obtenido en el presente trabajo y el índice calculado sobre la imagen *Landsat* sin ningún preprocesamiento adicional (nivel L1). Las comparaciones estadísticas se hicieron siempre con pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis o U de Mann-Whitney) debido a que el elevado tamaño de muestra distorsiona los valores de significación de las pruebas estadísticas tradicionales y aumenta las probabilidades de error de tipo II (Lin et al. 2013).

Las tendencias históricas fueron analizadas por separado para las zonas naturales y antrópicas. Los valores del índice se correlacionaron con la elevación sobre el nivel del mar, obtenida del modelo digital de elevación, mediante el índice producto-momento de Pearson, dado que las zonas montañosas en Cuba generalmente han tenido mayores niveles de conservación de la cobertura vegetal.



**Figura 1.** Representación de la secuencia de trabajo con las imágenes satelitales del Landsat 8 para la obtención de los datos empleados en la caracterización de la variabilidad espacial del NDVI en Cuba en el año 2017.

**Figure 1.** Representation of the working sequence with satellite imagery from Landsat 8 to extract data used to characterize the spatial variability of NDVI in Cuba in 2017.



Para demostrar la aplicabilidad del índice en estudios o actividades asociadas a la conservación de la biodiversidad se calcularon los valores medios del índice en las 23 áreas protegidas de mayor extensión de tierra emergida. Se compararon los valores medios de NDVI según las categorías de manejo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Cuba (SNAP) que presentan mayor extensión territorial (Parque Nacional, Área Protegida de Recursos Manejados, Elemento Natural Destacado, Reserva Ecológica, Refugio de Fauna, Reserva Florística Manejada, Paisaje Natural Protegido y Reserva Natural). Sin embargo, estos análisis generales son solo superficialmente informativos y carecen de aplicabilidad concreta dado que cada área protegida contiene una composición única de ecosistemas que enmascara cualquier comparación general.

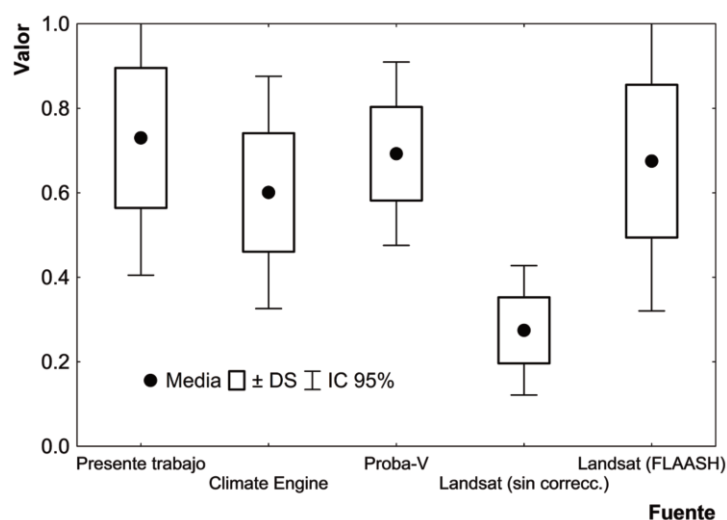
Todo el procesamiento estadístico se realizó en el programa *Statistica 8.0*. Los datos, mapas y coberturas obtenidas, así como materiales suplementarios, se encuentran disponible *online* en el repositorio *Figshare* (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.6465068>).

## Resultados

A pesar de las múltiples fuentes de variación que tiene el cálculo del NDVI entre sensores, los valores obtenidos de las distintas fuentes empleadas en este trabajo no muestran diferencias sustanciales en sus estimados sobre el escenario de la Ciénaga de Zapata (**Fig. 2**). Todos los valores, sin embargo, son superiores al NDVI que se calcula con la imagen del *Landsat* cruda, sin correcciones radiométricas.

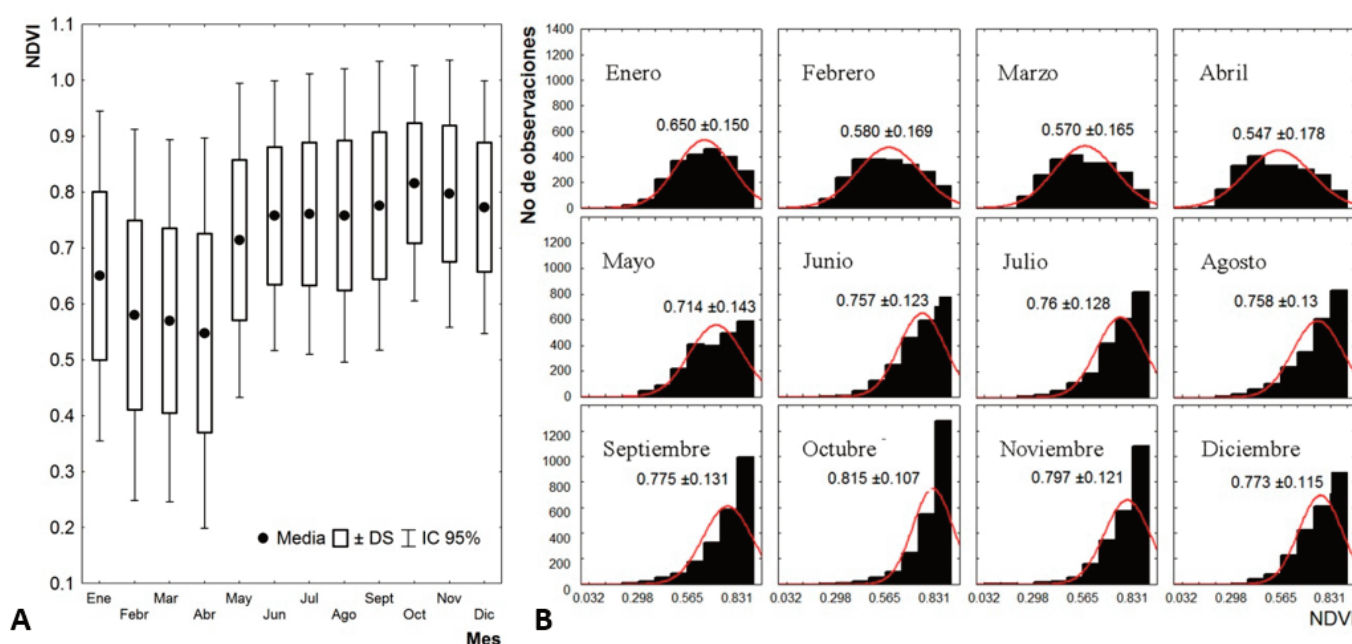
### Variación temporal del NDVI

La variación media anual del índice muestra un comportamiento cíclico entre valores mínimos de 0.54 en el mes de abril a máximos de 0.85 en octubre (**Fig. 3A**). La variabilidad de los datos aumenta ligeramente en los meses de menores promedios (febrero-abril). Los histogramas mensuales expresan un desplazamiento hacia valores mayores del índice a medida que avanza el año (**Fig. 3B**).



**Figura 2.** Comparación entre los valores medios del NDVI obtenidos de distintas fuentes y procesamiento en una muestra de puntos ( $n = 571$ ) sobre el escenario de la ciénaga de Zapata, Cuba.

**Figure 2.** Comparison among mean NDVI values obtained from different sources and procedures in a point sample ( $n = 571$ ) on the Zapata Swamp scenario, Cuba.



**Figura 3.** Variaciones mensuales de los valores medios (A) y su distribución (B) del NDVI en formaciones vegetales naturales de Cuba ( $n = 2263$  puntos de muestreo).

**Figure 3.** Monthly variation of mean (A) and distribution (B) of NDVI values in natural vegetation types in Cuba ( $n = 2263$  sample points).

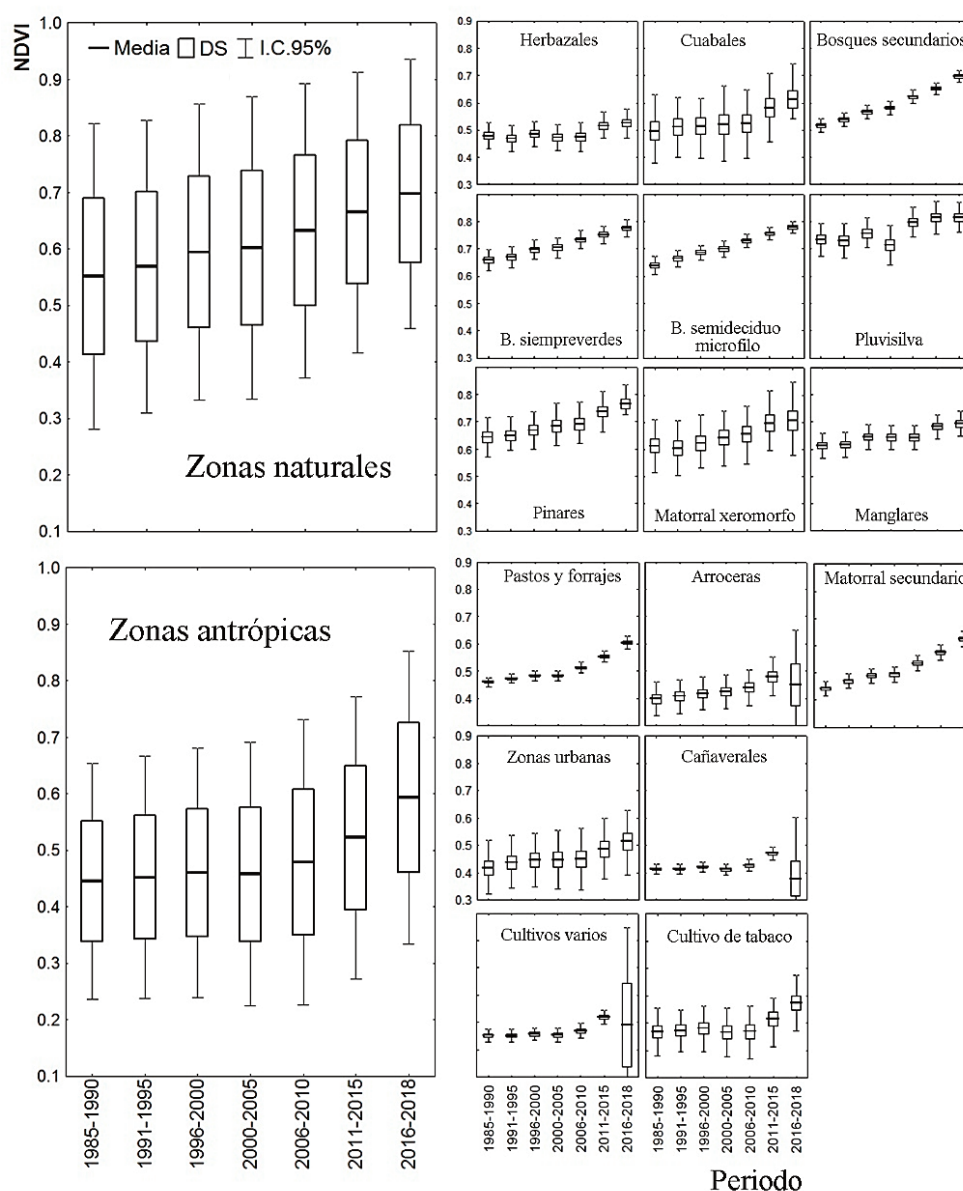
El análisis histórico muestra un incremento en los valores del índice desde el año 1985 hasta la actualidad (Fig. 4), tanto en los lugares naturales como en los antropogénicos, en los cuales el incremento comienza en el periodo 2005-2010. El aumento es sostenido en la mayoría de las formaciones vegetales boscosas, excepto en las pluvisilvas donde el índice históricamente es alto, aunque también aumenta en los últimos periodos, y es casi imperceptible en los herbazales y cuabales. En las zonas de origen antrópico el incremento de los últimos periodos es más marcado en los matorrales secundarios y en las zonas de pastizales y forrajes.

### Distribución espacial del NDVI

El escenario general del NDVI en Cuba (Fig. 5) mostró una distribución espacial de los valores, que están directamente relacionados con la distribución y tipos de cobertura vegetal. El índice tuvo una media global de  $0.702 \pm 0.198$  (media  $\pm 1$  DE), con valores mínimos de 0.04 y máximos sobre 0.99. El 71% de los valores estuvieron sobre 0.60 de NDVI. Los histogramas muestran una distribución diferente de los valores entre las zonas de actividad humana y naturales. En estas últimas el histograma tiene una asimetría marcadamente desplazada hacia valores altos de NDVI

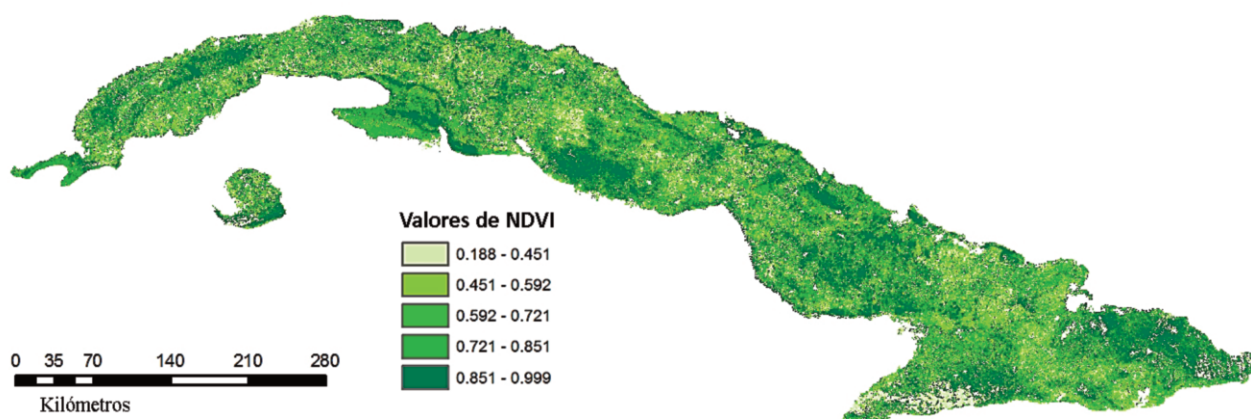
(Fig. 6), con el 60% de los puntos por encima de 0.80 (promedio de 0.78), mientras que las zonas de usos antropogénicos tienen su máximo alrededor de 0.50-0.80, intervalo en el que estaba el 56% de los puntos (promedio de 0.67). Las medias generales por tipo de cobertura (antropógenas vs natural-semi natural) no difieren estadísticamente por su alta variabilidad intrínseca, a pesar de la diferencia media superior al 10%.

El NDVI mostró diferencias significativas entre varias de las categorías de uso del suelo ( $H_{(5, n=5597)} = 313.38$ ;  $p < 0.001$ ), correspondiendo los menores valores promedios a las zonas pobladas y a las zonas de cultivos de caña y arroz (Fig. 7). Las tendencias centrales de estos índices no implican la ausencia de valores más extremos, ya que las distribuciones de estas variables suelen caracterizarse por largas colas en los extremos. Así, por ejemplo, las zonas arroceras, con índices significativamente inferiores a los pastos y forrajes, tuvieron una alta variabilidad por la existencia de campos con fases de cultivo marcadamente distintas que incluso alcanzaban valores superiores a 0.7 en los campos terminales del ciclo de cultivo, pero, en general, con predominio de valores del índice menores que en zonas de vegetación natural, en las cuales también pueden aparecer sitios puntuales con bajos valores.



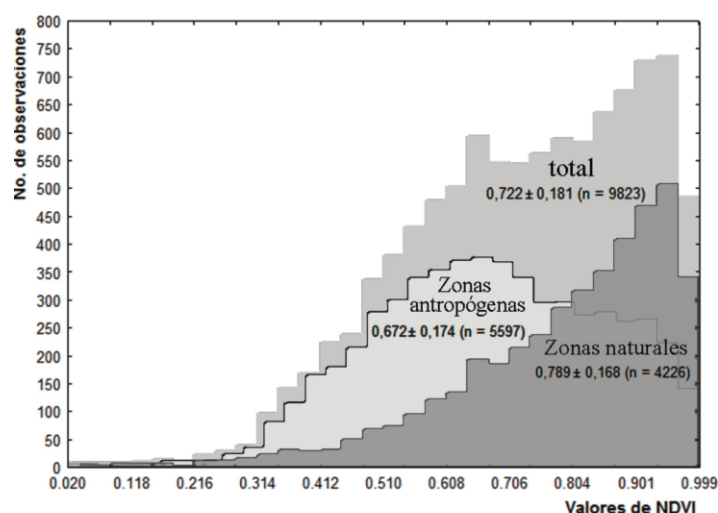
**Figura 4.** Variaciones históricas de los valores medios globales del NDVI, y su desglose en formaciones vegetales naturales y usos de suelo con influencia antropógena en Cuba ( $n=9909$ ) entre 1985 y 2018, según se registra en las composiciones quinquenales.

**Figure 4.** Historical variation of global mean NDVI values and its separation in natural vegetation types and anthropic influenced land use in Cuba ( $n=9909$ ) between 1985 and 2018, according to four-year composites.



**Figura 5.** Representación del mapa con la variabilidad espacial del NDVI en Cuba a partir de imágenes satelitales Landsat 8, con resolución 30 m, del año 2017.

**Figure 5.** Representation of the NDVI map showing the spatial variability of NDVI in Cuba, from Landsat 8 satellite images, at 30 m pixel size, from 2017.

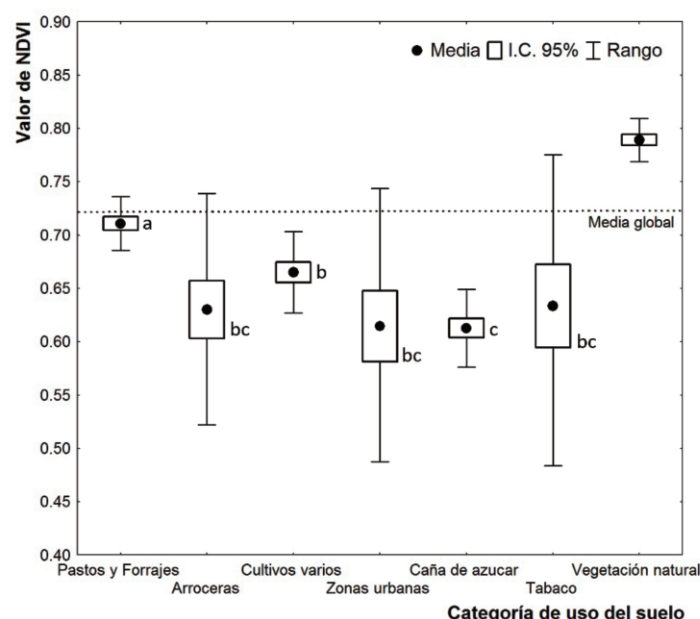


**Figura 6.** Distribución de frecuencias de los valores del NDVI en Cuba, por zonas naturales, zonas con actividades humanas y en total, obtenidos de imágenes satelitales Landsat 8 del año 2017. Los valores en las tres categorías corresponden a las medias y sus desviaciones estándar.

**Figure 6.** Frequency distribution of NDVI values in Cuba, divided into natural areas, anthropogenic areas and grand total, calculated using Landsat 8 satellite images in 2017. Values represent mean and standard deviations.

La mayoría de las formaciones vegetales naturales o seminaturales mostraron una distribución del índice NDVI asimétrica, desplazada hacia valores altos (Fig. 8). Se diferenciaron los cuabales y los herbazales de ciénaga, cuyos valores más frecuentes estuvieron entre 0.6 y 0.8, coincidiendo con tener los mínimos valores medios. En los matorrales secundarios, la máxima frecuencia estuvo asociada a valores entre 0.8 y 0.9 de índice. La forma general de los histogramas fue notablemente similar entre las pluvisilvas, bosques semidecíduos, siempreverdes y pinarales. Los bosques secundarios tendieron a poseer mayor frecuencia que los anteriores para valores máximos del índice.

En general las formaciones vegetales naturales mostraron una gran variabilidad en el NDVI, cuyos valores aparecen con una distribución estadística de colas muy alargadas. Por esta situación, la mayoría de los valores se concentran en un rango relativamente estrecho (intervalo de confianza al 95%) pero el rango total puede llegar a duplicar esta amplitud, incluso excluyendo los valores cla-

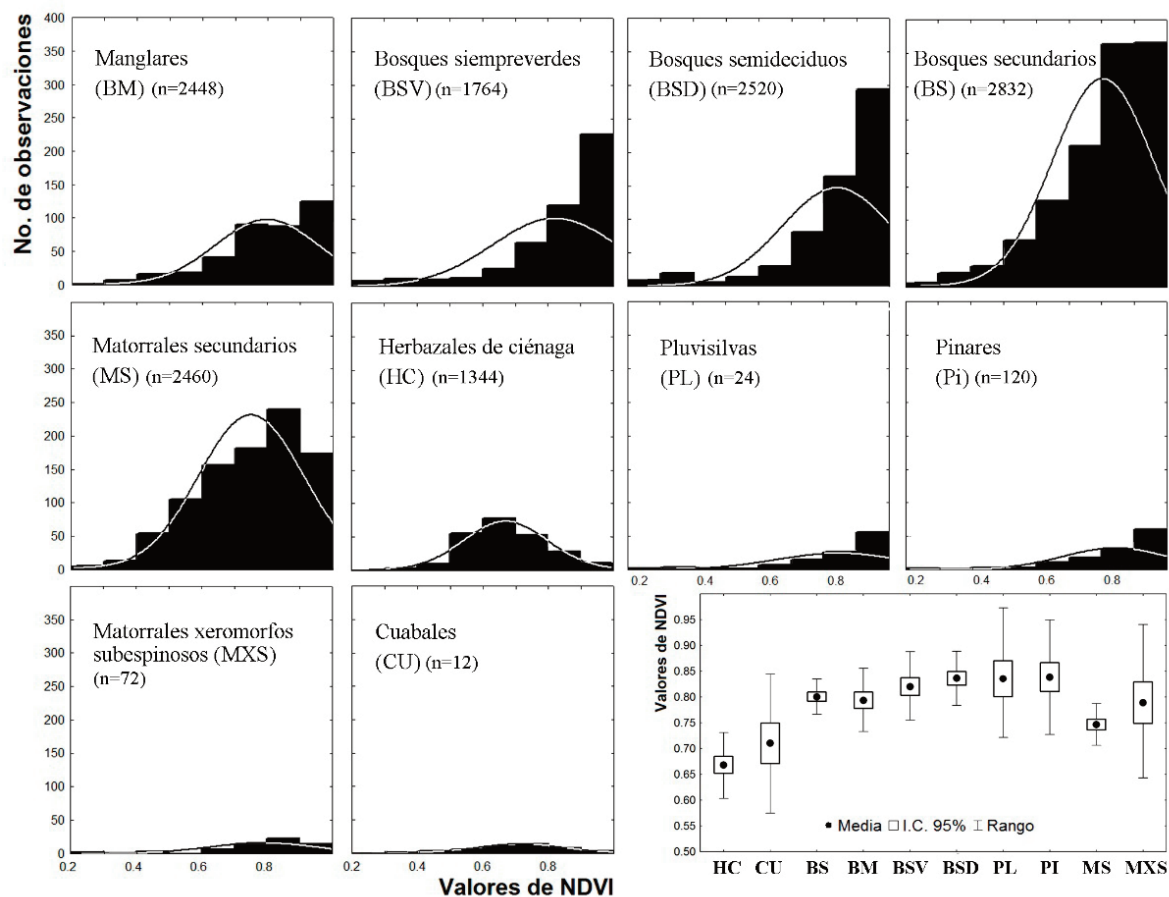


**Figure 7.** Comparación entre los valores medios del NDVI según los usos del suelo más extendidos en Cuba, obtenidos con imágenes satelitales Landsat 8 del año 2017. Valores con letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.5$ ) según una prueba de comparaciones múltiples por rangos.

**Figure 7.** Comparison among mean values of NDVI in the most extensive land uses in Cuba, calculated using Landsat 8 satellite images, in 2017. Different letters indicate statistically significant differences ( $P < 0.5$ ) by a multiple rank comparison test.

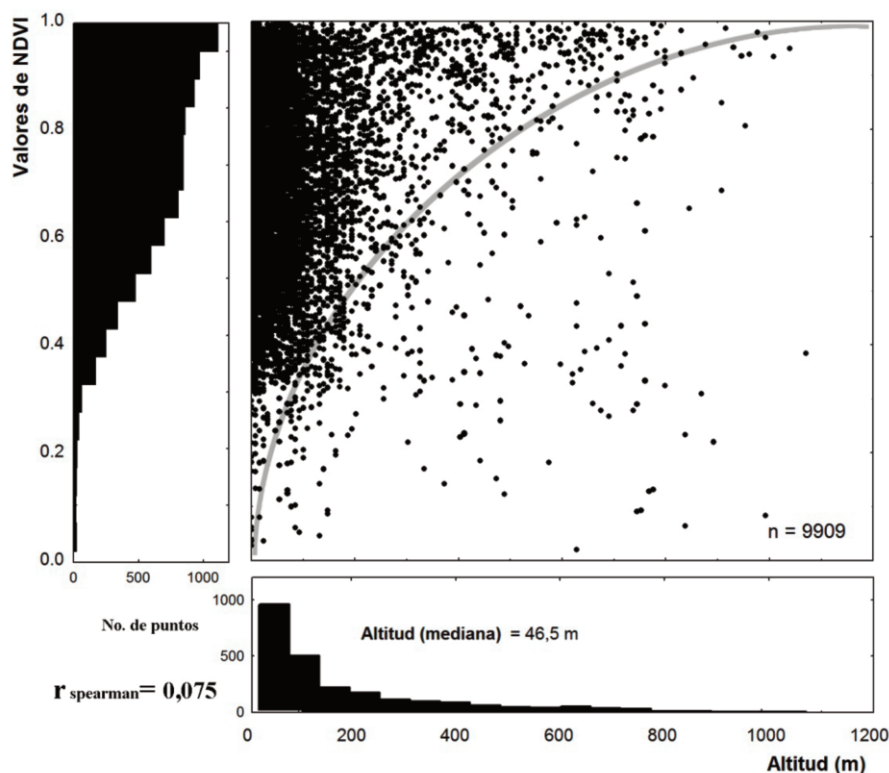
sificados como externos. Numerosos valores extremos, que se mantuvieron en la representación del último gráfico de la Figura 8 solo para mostrar este punto, pueden encontrarse, alrededor de este rango, en intervalos de hasta cuatro veces el intervalo de confianza al 95%. No hubo asociación significativa entre la altitud y los valores de NDVI (Fig. 9) ( $r = 0.08$ ), aunque esto puede estar asociado a que el 65% de los valores medidos estuvieron a altitudes inferiores a los 100 m sobre el nivel del mar. Por azar del muestreo solo aparecieron 7 valores estimados del índice a altitudes superiores a los 1200 m, y de ellos solo 3 tuvieron valores superiores a 0.60.

Las categorías de manejo del Sistema Nacional de Áreas protegidas mostraron, en conjunto, diferencias en los promedios globales del índice NDVI, en concordancia con sus diferentes objetos de conservación básicos (Fig. 10). Los Refugio de Fauna fueron los que presentaron menores valores del índice, y las Reservas Florísticas y Paisajes Naturales Protegidos tuvieron los mayores.



**Figure 8.** Distribuciones de los valores del NDVI de las principales formaciones vegetales cubanas y comparación de los valores medios (media, límites de confianza al 95% y rango; n: número de puntos extraídos en cada formación).

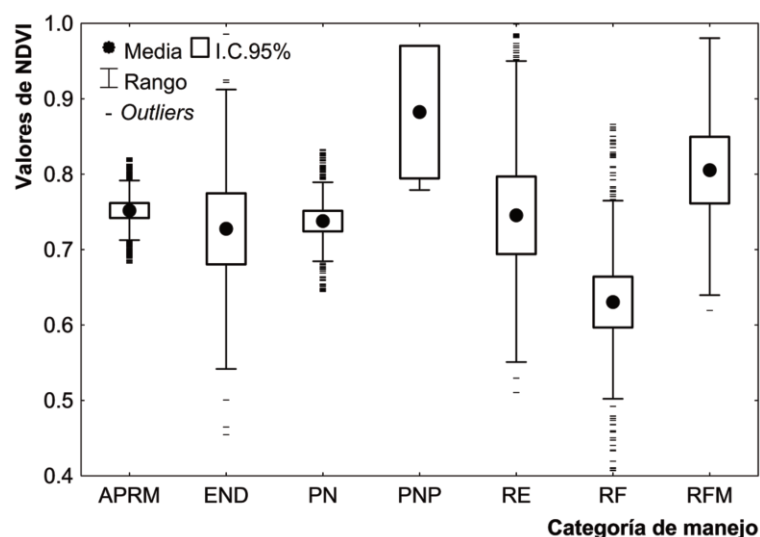
**Figure 8.** Values distribution for NDVI in main Cuban vegetation types and mean values comparison (mean, 95 % confidence limits and range; n: number of points sampled in each vegetal type).



**Figura 9.** Relación entre los valores del NDVI y la altitud en una muestra de 9909 puntos sobre el mapa del índice, calculado con imágenes satelitales Landsat 8, con resolución de 30 m, del año 2017.

**Figure 9.** Relationship among NDVI values and altitude in a 9909 points sample over the index map, calculated with Landsat 8 satellite images, at 30 m spatial resolution from 2017.





**Figura 10.** Comparación de los valores medios del NDVI entre las categorías de las áreas protegidas cubanas de mayor extensión espacial, obtenidos a partir de imágenes satelitales Landsat 8 (OLI), con resolución de 30 m, del año 2017. (Categorías de manejo: PN: Parque Nacional, APRM: Área Protegida de Recursos Manejados, END: Elemento Natural Destacado, RE: Reserva Ecológica, RF: Refugio de Fauna, RFM: Reserva Florística Manejada y PNP: Paisaje Natural Protegido).

**Figure 10.** Comparison among mean values of NDVI in Cuban protected areas main categories of higher spatial extent, calculated from Landsat 8 (OLI) satellite images, at 30 m spatial resolution in 2017. (Management categories: PN: National Park, APRM: Managed Resources Protected Zones, END: natural Outstanding Element, RE: Ecological Reserves, RF: Faunal Refugee, RFM: Managed Floristic Reserve and PNP: Natural Protected Landscape).

## Discusión

La media del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en Cuba, calculada a partir de los 9909 puntos aleatorios de las imágenes del año 2017, fue de 0.787, con un coeficiente de variación del 21%. Este valor es significativamente superior a todos los reportados por Cobos et al. (2016). Estos autores obtuvieron un valor medio del índice para los meses de febrero de  $0.18 \pm 0.01$  (DE) (mínimo: 0.001; máximo: 0.29) y para el mes de agosto de  $0.22 \pm 0.003$  (0.002 – 0.29). Los estimados máximos reportados por estos autores solo aparecen en el 1% de los puntos calculados en el presente trabajo.

Esto puede estar relacionado con las diferencias entre satélites en el cálculo del índice, que depende de múltiples factores como las diferencias en las funciones de respuesta en las bandas espectrales, la precisión de calibración, variaciones en el cenit solar, efectos de la reflectancia bidireccional de la superficie, las condiciones atmosféricas, la topografía y la presencia de nubes (Steven et al. 2003; van Leeuwen et al. 2006; Detsch et al. 2016). Del Grosso et al. (2018), por ejemplo, compararon el NDVI del MODIS con el del AVHRR y encontraron que el último era mejor predictor de la productividad en ecosistemas de herbazales. Incluso entre productos de un mismo sensor puede haber diferencias, como es el caso del NDVI-300m y del NDVI-V2-1km del sensor PROBA-V, por la estrategia de composición del producto y el uso de las correcciones espectrales.

La diferencia entre valores del índice también puede verse influida por las diferencias en la resolución espacial de las imágenes empleadas y las diferencias en la densidad espacial de la cobertura del muestreo, dado por los desiguales tamaños de muestra o la segregación de los factores de variación (uso del suelo y tipo de formación vegetal). A pesar de todo, la alta variabilidad en este indicador conduce a que no se detecten diferencias significativas entre las distintas fuentes de información empleadas en el presente trabajo.

Las diferencias de procedimiento de acoplamiento de las imágenes pueden influir en los valores espectrales. Sin embargo, es poco probable que esto influya en los resultados al ser el NDVI un índice basado en tasas entre bandas y, como tal, tiene la ventaja de que minimiza las influencias, ruidos o errores globales que afectan por igual a todas las bandas, como las atribuibles a efectos atmos-

féricos no selectivos, nubes, sombras, ángulos del sol, topografía o atenuación atmosféricas. También reduce errores atribuibles a los instrumentos o la calibración. La magnitud de esta robustez depende de la correlación entre la absorptividad de cada banda y el grado en que la superficie reflectora muestre un comportamiento lambertiano (Huete et al. 2002). De cualquier forma, incluso a pesar de estas razones, es válido y conservador asumir que los valores propuestos en este trabajo solo deben interpretarse en términos relativos y compararse dentro del mismo escenario o con valores calculados en imágenes procesadas bajo el mismo procedimiento.

La variación mensual del índice mostró la misma tendencia descrita por Cobos et al. (2016), salvando la diferencia en magnitudes absolutas y variabilidad. Los datos de sensores remotos deben ser comparados con cautela entre trabajos ya que el procesamiento estadístico de series de datos cuantitativos tan extensos y con distribuciones probabilísticas de colas tan largas, puede dar ideas distorsionadas de exactitud y precisión en los estimados. En esta situación, los estadígrafos descriptivos tradicionales asociados a distribuciones normales (promedio, desviación estándar, error estándar, intervalos de confianza), deben tratarse con cuidado, así como las pruebas de significación de hipótesis nulas que se ven afectadas por el tamaño de muestra. Por ello es recomendable el empleo de datos cortados, para eliminar extremos no representativos pero muy influyentes en los resultados.

Los valores de NDVI asociados a categorías de uso del suelo pueden reflejar diversos factores, que determinan sus amplios rangos de variabilidad. Entre los cultivos, se destacan el tabaco y las arroceras como los de mayor variación. Esto puede estar asociado a las diferencias en las distintas fases de los cultivos que coexisten simultáneamente formando un mosaico paisajístico, así como al rango de diferencia del valor del índice entre estas fases (Zhou et al. 2017). Los campos de arroz, por ejemplo, siguen un complejo ciclo con fases marcadamente distintas (García-Cárdenas et al. 2019), que varían entre el suelo desnudo de los campos en preparación, anegados, recién sembrados y con plantas pequeñas (con índices cercanos a cero) hasta los campos cubiertos de una muy densa capa de plantas de arroz de más de un metro de altura (con índices de vegetación incluso superiores a 0.9). Los cultivos de caña de azúcar, por su parte, tienen mucha menor densidad de biomasa fotosintéticamente activa (más en tallos y con mayor separa-



ción entre ellos) y en las etapas iniciales del cultivo la reflectancia del suelo puede interferir en los valores espectrales a nivel subpixelar. Además, en momentos finales del ciclo, tienen una mayor proporción de tallos no fotosintéticos y un menor contenido de agua intrínseco, tanto en las plantas como en el suelo, todo lo cual se refleja en índices menos variables (Pinheiro et al. 2018). Las zonas pobladas también destacan en su variabilidad, ya que contienen valores muy extremos en ambos sentidos, zonas de nula cobertura vegetal y reflectividad muy alta en el infrarrojo (construcciones) hasta parques y zonas arboladas (Mishra et al. 2019).

La ausencia de relación entre los valores del índice con la altitud, a pesar de que los bosques más extensos y mejor conservados se encuentran en zonas montañosas, pudiera explicarse por la amplia variabilidad en la reflectividad interna de estas formaciones y al efecto de la fragmentación. Pero debe tenerse en cuenta que la distribución aleatoria de los puntos del muestreo implica un grado de representatividad de las distintas altitudes proporcional a su frecuencia natural, y ello puede influir en la detección de una posible asociación. También hay que señalar, que a pesar del procedimiento de selección y limpiado de las imágenes, pueden quedar remanentes de nubes y sombras que alteren los valores del índice y estas usualmente se concentran en zonas montañosas. Aunque el NDVI es relativamente robusto al efecto de las nubes y sus sombras, así como a la topografía y la dirección de la iluminación, no puede desestimarse su posible influencia en la variabilidad de los estimados que se obtienen a iguales altitudes. El ángulo de elevación del sol en el momento de adquisición de las imágenes del *Landsat* 8 sobre el territorio cubano varía de 45.09° (Guanahacabibes) a 52.35° (Santiago de Cuba).

El NDVI como índice también muestra determinadas desventajas, asociadas a su comportamiento no lineal y asintótico, que lo hace relativamente insensible a variaciones de la cobertura vegetal a partir de ciertas condiciones de esta. Este comportamiento de saturación reduce su eficiencia para diferenciar las propiedades entre coberturas boscosas densas. Tampoco tiene en cuenta las interacciones del dosel y el suelo y las anisotropías bidireccionales en las reflectancias, particularmente asociadas a las sombras dentro del dosel. El EVI (*Enhanced Vegetation Index*) se ha diseñado para mejorar las capacidades de cuantificación del índice, sobre todo al no saturarse con las altas densidades de vegetación por lo que su uso combinado puede ser una mejor herramienta para las zonas boscosas tropicales (Huete et al. 2002).

El conjunto de resultados obtenidos es consistente con la hipótesis inicial del trabajo, ya que evidencian altos niveles de variación espacial del NDVI – superiores en áreas de cultivos. La tendencia histórica, durante los pasados 33 años, mostró poca variación interanual, aunque se percibe una ligera tendencia al incremento global que pudiera ser explicado por el desarrollo de las estrategias conservacionistas, el desarrollo de prácticas amigables en el uso del suelo y la recuperación de zonas boscosas, referidas por Goulart et al. (2018). Las diferentes formaciones vegetales, aunque con diferencias en sus valores anuales medios del índice, mostraban en mayor o menor medida un ciclo de variación anual consistente, en el cual los valores de NDVI tienden a aumentar a partir del inicio del periodo lluvioso para volver a disminuir a finales del año.

El análisis espacial y temporal del NDVI mostrado en este trabajo puede contribuir a mejorar los estudios en Cuba de predicción de la distribución de la diversidad biológica (ej.: Ferrer-Sánchez y Rodríguez-Estrella 2016; Núñez-Penichet et al. 2019). También puede incorporarse como un componente en la planificación de la conservación, al haberse empleado en la estimación de la riqueza vegetal (Madonsela et al. 2017; Pau et al. 2012; Madonsela et al. 2017) y como un proxy para la riqueza de aves (Leveau et al. 2017). A pesar de lo ampliamente empleado a nivel mundial y de su utilidad en ecología (Pettorelli et al. 2011), solo existen contados estudios en Cuba que utilizan el NDVI o algún otro índice espectral (ej.: Cobos et al. 2016). Los patrones de variación descritos en este trabajo muestran el uso potencial que este índice puede tener en estudios de impacto u ordenamiento ambiental.

El empleo de una fuente de información gratuita tan importante como las imágenes de la serie *Landsat* ha resultado de valor excepcional para estudios de la vegetación. A pesar de ser de resolución media (30 m), estas imágenes han actuado mejor o similar a otros sensores de mayor resolución espacial (como *Quickbird* e *IKONOS*) en la estimación de las características de las cubiertas boscosas (Thenkabail et al. 2003; Rocchini 2007). Los estudios sobre la biodiversidad cubana y los programas de monitoreo de las acciones de conservación, tanto en las áreas protegidas como no protegidas, pueden recibir un impulso importante si se intensifica el empleo de estas herramientas provenientes de sensores remotos.

## Referencias

- Bonet, F.J. 2004. Caracterización de la dinámica Vegetal en el parque Natural de Sierra de Huétor (Granada, España) mediante el uso de SIG. En: Conesa, C., Álvarez, Y., Martínez, J. B. (eds.), *Medio Ambiente, recursos y riesgos naturales: Análisis mediante tecnología SIG y Teledetección, Vol. I.*, pp.141-153. Grupo de métodos cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia, Murcia, España.
- Capote, R.P., Berazaín, R. 1984. Clasificación de las formaciones vegetales de Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional* 27-75.
- Cordeira-Estrada, S., Lorenzo-Sánchez, S., Areces-Mallea, S., Martínez-Bayón, C. 2008. Mapping of the spatial distribution of benthic habitats in the Gulf of Batabanó using Landsat-7 images. *Ciencias Marinas* 34(2): 213–222
- Cobos, M.E., Cruz, D.D., Hernández, M. 2016. Análisis multitemporal del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) en Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional* 37: 15-18.
- Del Grosso, S.J., Parton, W., Stohlgren, T., Zheng, D., Bachelet, D., Prince, S., Olson, K.R. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology* 89(8): 2117-2126.
- Del Grosso, S.J., Parton, W.J., Derner, J.D. Chen, M., Tucker, C.J. 2018. Simple models to predict grassland ecosystem C exchange and actual evapotranspiration using NDVI and environmental variables. *Agricultural and Forest Meteorology* 249: 1-10.
- Denis, D. 2015. Análisis multitemporal de imágenes Landsat para evaluar las variaciones de la cobertura vegetal emergente en la laguna Leonero, Granma, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional* 36: 47-53.
- Detsch, F., Otte, I., Appelhaus, T., Nauss, T. 2016. A comparative study of cross-product NDVI dynamics in the Kilimanjaro region-A matter of sensor, degradation calibration, and significance. *Remote Sensing* 8: 159.
- Dierckx, W., Sterckx, S., Benhadji, I., Livens, S., Duhoux, G., Van Achteren, T., Francois, M., Mellab, K., Saint, G. 2014. PROBA-V mission for global vegetation monitoring: standard products and image quality. *International Journal of Remote Sensing* 35(7): 2589-2614.
- Estrada, E., Martín, G., Martínez, P., Vioel, S., Capote, R. 2013. Mapa (BD-SIG) de vegetación natural y seminatural de Cuba V.1 sobre Landsat ETM 7 Slc-Off Gap Filled, Circa 2011. En: *Libro de resúmenes. "IV Congreso sobre Manejo de Ecosistemas y Biodiversidad de la VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana, Cuba, del 4 al 8 de julio de 2013.* Disponible en: <https://docplayer.es/94144092-Mapa-bd-sig-de-vegetacion-natural-y-seminatural-de-cuba-v-1-sobre-landsat-etm-7-slc-off-gap-filled-circa-2011.html>
- Fairbanks, D., Mcwire, K. 2004. Patterns of floristic richness in vegetation communities of California: Regional scale analysis with multi-temporal NDVI. *Global Ecology and Biogeography* 13(3): 221-235.
- Feeley, K.J., Gillespie, T., Terborgh, J. 2005. The utility of spectral indices from lysat ETM+ for measuring the structure y composition of tropical dry forests. *Biotrópica* 37(4): 508-519.
- Ferrer-Sánchez, Y., Rodríguez-Estrella, R. 2016. How rare species conservation management can be strengthened with the use of ecological niche modelling: The case for endangered endemic Gundlach's Hawk and Cuban Black-Hawk. *Global Ecology and Conservation* 5: 88–99
- García-Cárdenas, D.A., Ramón-Valencia, J.A., Alzate-Velásquez, D.F., Palacios-González, J.R. 2019. Dynamics of the indices NDVI and GNDVI in a rice growing in its reproduction phase from multi-spectral aerial images taken by drones. En: Corrales J., Angelov P., Iglesias J. (eds) *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting*

- Agriculture to Climate Change II. AACC 2018*. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 893. Springer, Cham, Alemania.
- Gillespie, T.W., Ostermann-Kelm, S., Donga, C., Willis, K.S., Okin G.S., MacDonald, G.M. 2018. Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California. *Ecological Indicators* 88: 485-494.
- Gilmanov, T.G., Tieszen, L.L., Wylie, B.K., Flanagan, L.B., Frank, A.B., Haferkamp, M.R., Meyers, T.P., Morgan, J.A. 2005. Integration of CO<sub>2</sub> flux and remotely-sensed data for primary production and ecosystem respiration analyses in the Northern Great Plains: potential for quantitative spatial extrapolation. *Global Ecology and Biogeography* 14(3): 271-292.
- Gonzaga, C.A. 2015. Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *Revista CEDAMAZ* 5(1): 30-4.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27.
- Goulart, F., Leyva, A., Nelson, E., Soares-Filho, B. 2018. Conservation lessons from Cuba: Connecting science and policy. *Biological Conservation* 217: 280-288.
- Hernance, J.F., Augustine, D.J., Derner, J.D. 2015. Quantifying characteristic growth dynamics in a semi-arid grassland ecosystem by predicting short-term NDVI phenology from daily rainfall: a simple four parameter coupled-reservoir model. *International Journal of Remote Sensing* 36(22): 5637-5663.
- Hernández, M., Cruz, D. 2016. Cobertura de vegetación natural en Parques Nacionales de Cuba: análisis multitemporal y variación futura de las condiciones bioclimáticas. *Revista del Jardín Botánico Nacional* 37: 93-102.
- Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International journal of remote sensing* 7(11): 1417-1434.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing Environment* 83(1): 195-213.
- Huntington, J.L., Hegewisch, K.C., Daudert, B., Morton, C.G., Abatzoglou, J.T., McEvoy, D.J., Erickson, T. 2017. Climate Engine: cloud computing and visualization of climate and remote sensing data for advanced natural resource monitoring and process understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98 (11): 2397-2410.
- Klijn, F. (ed.) 1994. *Ecosystem classification for environmental management*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Países Bajos.
- Leveau, L.M., Leveau, C.M., Villegas, M., Cursach, J.C., Suazo, C.G. 2017. Bird communities along urbanization gradients: a comparative analysis among three neotropical cities. *Ornitología Neotropical* 28: 77-87.
- Lin, M., Lucas, H.C., Shmueli, G. 2013. Research commentary-too big to fail: large samples and the p-value problem. *Information Systems Research* 24: 906-917.
- Madonsela, S., Cho, M.A., Ramoelo, A., Mutanga, O. 2017. Remote sensing of species diversity using Landsat 8 spectral variables. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 133: 116-127.
- Mishra, B., Sandifer, J., Gyawali, B.R. 2019. Urban Heat Island in Kathmandu, Nepal: Evaluating Relationship between NDVI and LST from 2000 to 2018. *International Journal of Environment* 8(1): 17-29.
- Morejón, M., Vega, M., Escarré, A., Gómez, R., Febles, J.M., 2010. Clasificación de la vegetación en los sectores superiores de cuencas de la región occidental de Pinar del Río utilizando la teledetección. *Ciencias de la Tierra y el Espacio* 11: 60-68.
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J.P., Jongman, R.H., Tarantino, C., Adamo, M., Mairota, P. 2013. Remote sensing for conservation monitoring: assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators* 33: 45-59.
- Neigh, C.S.R., Tucker, C.J., Townshend, J.R.G. 2008. North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sensing Environment*, 112: 1749-1772.
- Núñez-Penichet, C., Cobos, M.E., Barro, A., Soberón, J. 2019. Potential migratory routes of *Urania boisduvalii* (Lepidoptera: Uraniidae) among host plant populations. *Diversity and Distributions* 25(3):478-488.
- Pau, S., Gillespie, T.W., Wolkovich, E.M. 2012. Dissecting NDVI-species richness relationships in Hawaiian dry forests. *Journal of Biogeography* 39(9): 1678-1686.
- Pereira, H.M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G.N., Jongman, R.H.G., Scholes, R.J., et al. 2013. Essential biodiversity variables. *Science* 339: 277-278.
- Pettorelli, N. 2013. *The normalized differential vegetation index*. Oxford University Press. Oxford, Reino Unido. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>
- Pettorelli, N., Chauvenet, A.L.M., Dufy, J.P., Cornforth, W.A., Meillere, A., Baillie, J.E.M. 2012. Tracking the effect of climate change on ecosystem functioning using protected areas: Africa as a case study. *Ecological Indicators* 20: 269-276.
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M., Kausrud, K. 2011. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research* 46: 15-27.
- Pinheiro, I., Melo-Damian, J., Cherubin, M., Silva, P., Fiorio, P., Cerri, C., Cerri, C. 2018. Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal. *Agronomy* 8(9): 196.
- Ponvert-Delisle, B. 2016. Algunas consideraciones sobre el comportamiento de la sequía agrícola en la agricultura de Cuba y el uso de imágenes por satélites en su evaluación. *Revista Cultivos Tropicales* 37(3): 22-41.
- Richards, J.A., Jia, X. 2006. Remote sensing digital image analysis: an introduction (4.ª edición). Springer Nature Switzerland AG, Basilea, Suiza.
- Rocchini, D. 2007. Effects of spatial and spectral resolution in estimating ecosystem  $\alpha$ -diversity by satellite imagery. *Remote sensing of Environment* 111(4): 423-434.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.H., Harlan, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC. Greenbelt, MD, Estados Unidos.
- Sacristán, F. 2006. La tecnología al servicio del medio ambiente. *Revista Cubana de Meteorología* 13(1): 51-55.
- Smets, B., Jacobs, T., Swinnen, E., Toté, C., Claes P. 2016. *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Collection 300m, Version 1. Issue: I1.02. BA V1 Product User Manual. GIO-GL Lot1, GMES Initial operations. C-GLOPS1 consortium. Disponible en: [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/GIOGL1\\_ATBD\\_NDVI300m-V1\\_I1.02.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/GIOGL1_ATBD_NDVI300m-V1_I1.02.pdf)
- Steven, M.D., Malthus, T.J., Baret, F., Xu, H., Chopping, M.J. 2003. Inter-calibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sensing of Environment* 88(4): 412-422.
- Thenkabail, P.S., Hall, J., Lin, T., Ashton, M. S., Harris, D., Enclona, E.A. 2003. Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4(3): 255-270.
- Tun-Dzul, F.D., Vester, H., Durán, R., Schmook, B. 2008. Estructura arbórea y variabilidad temporal del NDVI en los "bajos inundables" de la Península de Yucatán, México. *Polibotánica* 25: 69-90.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Flodely, M. 2003. Remote sensing for biodiversity science y conservation. *Tree* 18: 306-314.
- van Leeuwen, W.J.D., Casady, G.M., Neary, D.G., Bautista, S., Alloza, J.A., Carmel, Y., et al. 2010. Monitoring post-wildfire vegetation response with remotely sensed time-series data in Spain, USA and Israel. *International Journal of Wildland Fire* 19: 75-93. <http://dx.doi.org/10.1071/WF08078>
- Willis, K.S. 2015. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation* 182: 233-242.
- Yebra, M., Chuvieco, E. 2008. Modelos de Simulación de Reflectividad en ecología: potencialidades y problemas. *Ecosistemas* 17(3): 23-38.
- Zanter, K.M. 2004. The US Geological Survey's Global Visualization Viewer. En: *Abstract of the American Geophysical Union, 2004 Fall Meeting, San Francisco, CA, December 13-17, 2004*. The American Geophysical Union. Washington, D.C, Estados Unidos.
- Zhou, X., Zheng, H.B., Xu, X.Q., He, J.Y., Ge, X.K., Yao, X., et al. 2017. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130: 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.05.003>

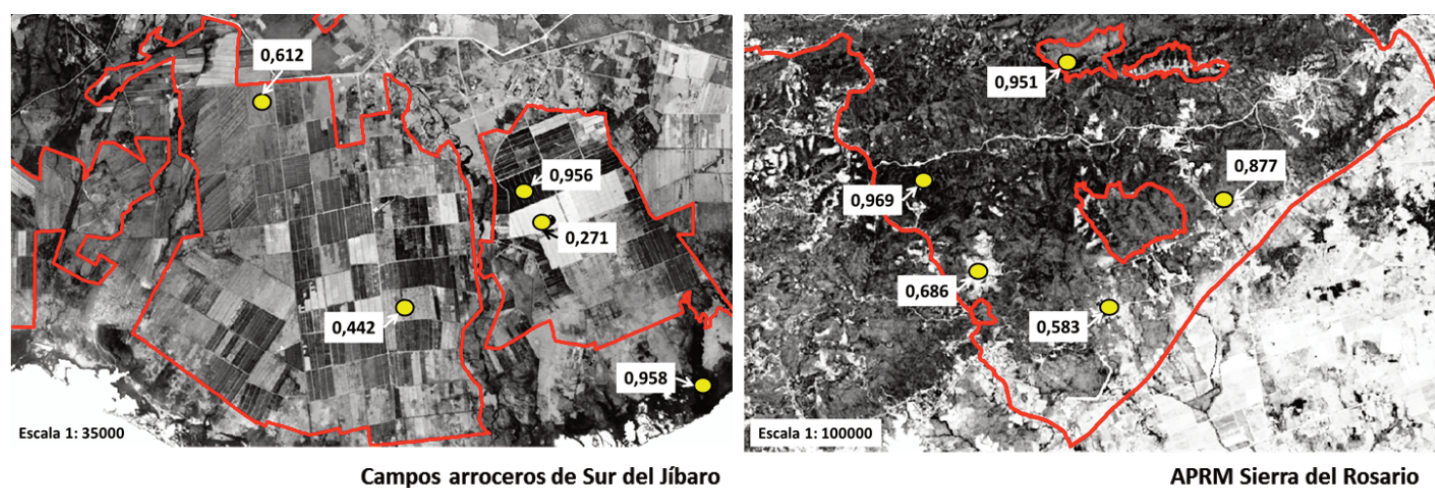


## Apéndice 1./ Appendix 1.

**Tabla 1.** Datos de las imágenes del satélite Landsat 8 empleadas para la descripción de la variación espacial del NDVI en Cuba en el año 2017

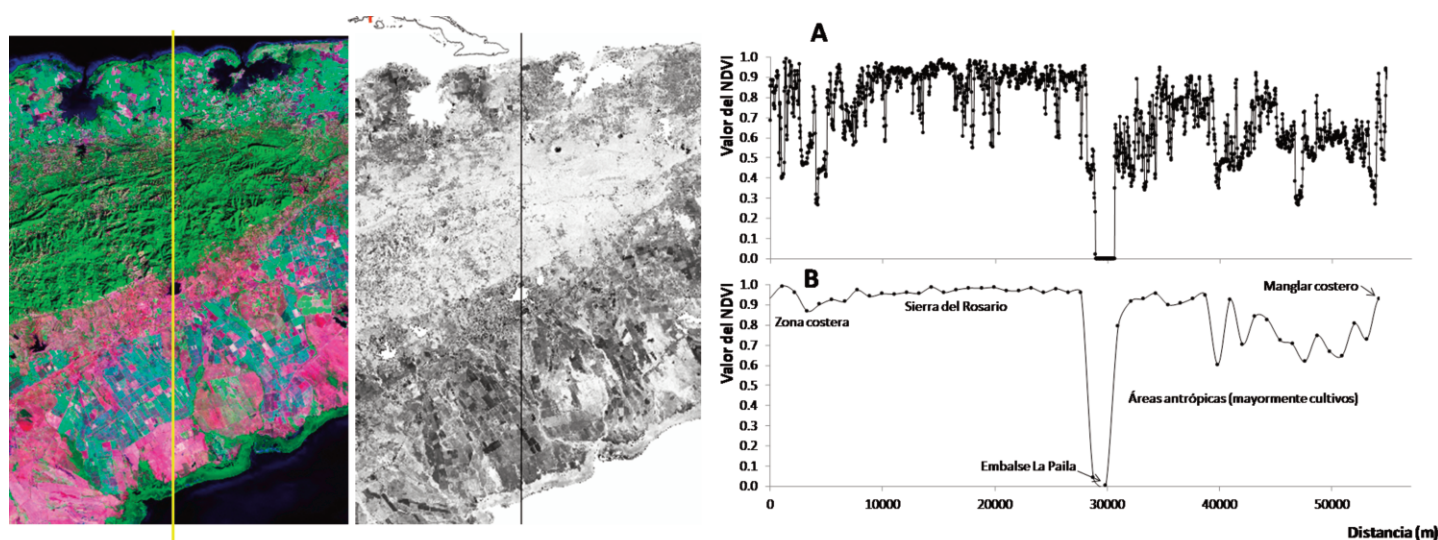
**Table 1.** Data from Landsat 8 satellite images used to describe the spatial variation of the NDVI in Cuba in 2017.

Escenario (fila y columna)	Identificador	Fecha de adquisición (mes/día/año)
17-45	LC80170452017040LGN00	02/09/17
16-45	LC80160452017129LGN00	05/09/17
17-44	LC80170442017040LGN00	02/09/17
16-44	LC80160442017129LGN00	05/09/17
15-44	LC80150442017042LGN00	02/11/17
15-45	LC80150452017042LGN00	02/11/17
14-45	LC80140452017147LGN00	05/27/17
14-44	LC80140442017147LGN00	05/27/17
13-45	LC80130452017092LGN00	04/02/17
12-45	LC80120452017149LGN00	05/29/17
12-46	LC80120462017149LGN00	05/29/17
11-46	LC80110462017046LGN00	02/15/17
10-46	LC80100462017039LGN00	02/08/17



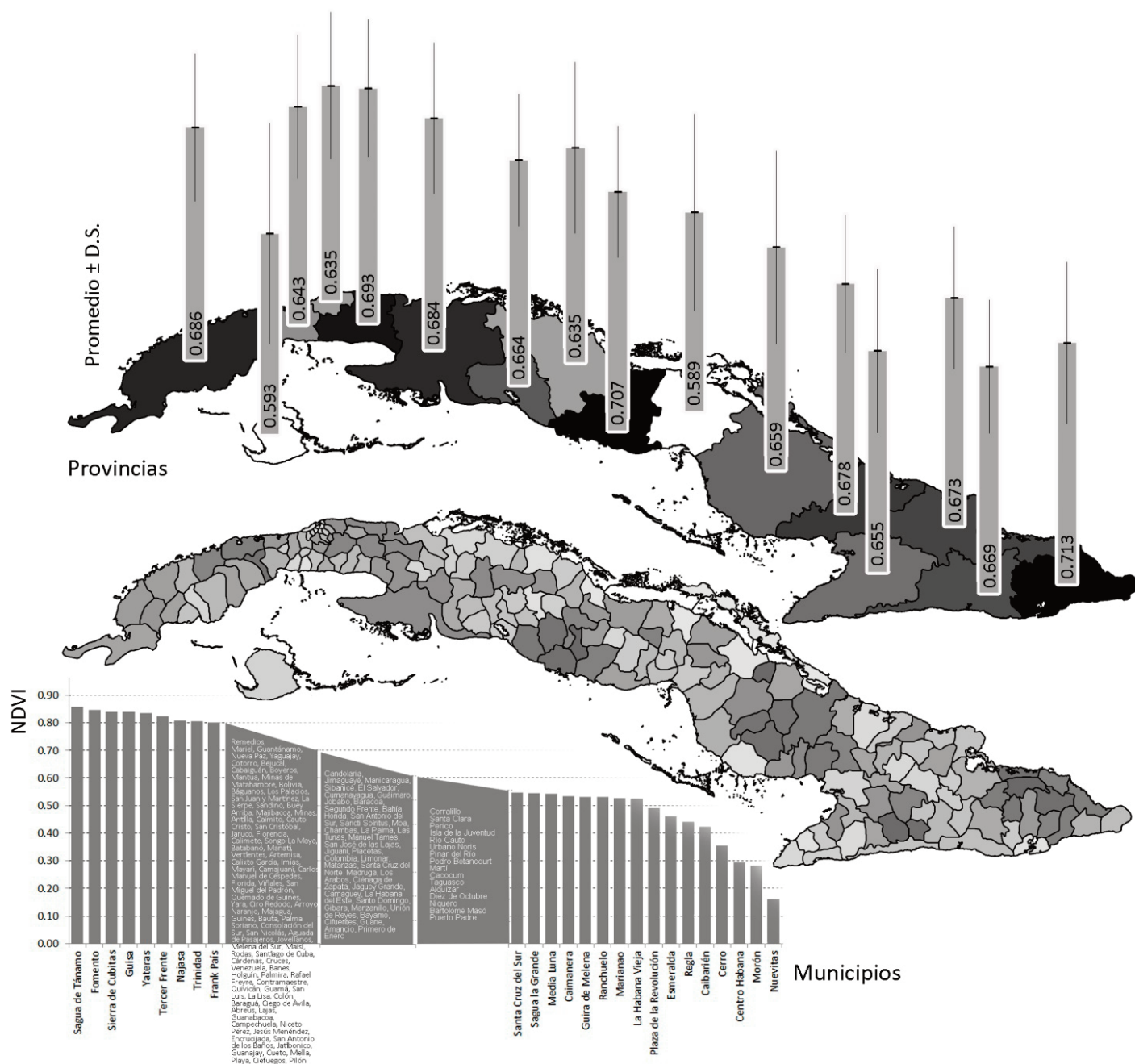
**Figura 1.** Recortes ampliados del escenario nacional como muestra de comparación de las diferencias en los valores del NDVI en áreas antrópicas (arroceras de Sur del Jíbaro, provincia de Sancti-Spiritus) y en áreas naturales (Área Protegida de Recursos Manejados - APRM- Sierra del Rosario) cubanas.

**Figure 1.** Zoomed areas extracted from the nationwide scenario as comparative sample of the spatial differences in NDVI in anthropic areas (rice fields from Sur del Jíbaro, Sancti-Spiritus province) and in Cuban natural areas (Managed-Resources Protected Area - APRM- Sierra del Rosario).



**Figura 2.** Perfil del NDVI transversal al eje longitudinal de la isla a nivel de Pinar del Río (Sierra del Rosario), Cuba, calculado con imágenes satelitales Landsat 8, con resoluciones de 30 m (A) y 100 m (B) (línea suavizada), del año 2017. Se muestra una composición a falso color (4-2-1) con sombreado de elevaciones, para facilitar la ubicación espacial del perfil.

**Figure 2.** NDVI profiles across a vertical line perpendicular to longitudinal axis of the main island by Pinar del Río province (Sierra del Rosario), Cuba, calculated with Landsat 8 satellite images, at 30 m spatial resolution from 2017 (smooth line). A false color band composition (4-2-1) with hill shadowing is shown to facilitate spatial location of the profile.



**Figura 3.** Diferencias espaciales en los valores medios del NDVI a distintas escalas, siguiendo las divisiones político-administrativas del Cuba (Provincias y Municipios), calculado con imágenes satelitales Landsat 8 del año 2017.

**Figure 3.** Spatial differences in mean NDVI values at two scales, following political – administrative division in Cuba (Provinces and Municipalities), calculated with Landsat 8 satellite images from 2017.