



**Universidad  
de Holguín**

**FACULTAD DE  
CIENCIAS NATURALES y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero  
Agrónomo**

**Título: Determinación mediante teledetección de índices  
espectrales de vegetación en el agro ecosistema Mayarí y  
su variación espacio temporal.**

**Autor: Luis Carlos Reyes Velázquez**

**Tutores: Ing. Roberto Alejandro García Reyes**

**Dr.C Mario Damián González Posada-Dacosta**

**Holguín2021**

## RESUMEN

Las técnicas de teledetección han cobrado mayor uso para detectar los cambios ocurridos en los ecosistemas a partir del uso de índices de vegetación. El objetivo de la investigación fue determinar en el agro ecosistema de Mayarí la variación espacio temporal mediante sensoramiento remoto de índices de vegetación. Se calcularon los índices NDVI y SAVI en el software QGis 3.10 versión A Coruña. Las imágenes utilizadas procedieron de los satélites comerciales Landsat 5 y Landsat 8 OLI/TIRS del servicio geológico de los Estados Unidos. La cuadrícula utilizada fue la 011/046 y el sistema de proyección geográfica WGS/UTM Zona 18 Norte. Los índices de vegetación determinados muestran la variación espacio temporal del estado de la vegetación a lo largo de los períodos de tiempo analizados. Para el caso del NDVI sus valores presentan de forma general una variación de -1 para áreas con bajo nivel de vegetación y el de 1 para altas densidades de especies vegetales. Los valores SAVI ajusta los valores de las bandas roja e infrarroja cercana del NDVI; con un incremento de la escases de vegetación en los años 2016 y 2020 con valores de 0.4268 y 0.5031.

## **ABSTRACT**

Remote sensing techniques have become more widely used to detect changes in ecosystems from the use of vegetation indices. The objective of the research was to determine the spatio-temporal variation in the Mayarí agroecosystem through remote sensing of vegetation indices. The NDVI and SAVI indices were calculated in the QGIS 3.10 ACoruña version software. The images used came from the commercial Landsat 5 and Landsat 8 OLI / TIRS satellites of the United States Geological Survey. The grid used was 011/046 and the WGS / UTM Zona 18 Norte geographic projection system. The determined vegetation indices show the spatio-temporal variation of the state of the vegetation throughout the periods of time analyzed. In the case of NDVI, its values generally show a variation of -1 for areas with low vegetation levels and 1 for high densities of plant species. The SAVI values adjust the values of the red and near infrared bands of the NDVI; with an increase in the scarcity of vegetation in the years 2016 and 2020 with values of 0.4268 and 0.5031.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Hipótesis de la investigación:.....	2
Objetivo general:.....	3
Objetivos específicos: .....	3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
1. Factores climáticos y su efecto en la vegetación .....	4
2. Principales factores que influyen en las características de la vegetación .....	5
3. Teledetección o percepción remota en el estudio de la vegetación.....	6
1.1. Espectro electromagnético.....	8
2.1.2. Radiación electromagnética.....	9
2.1.2. El efecto de la atmósfera sobre la energía electromagnética .....	11
2.2. Características de los sensores aerotransportados .....	13
2.2.1. Características de Landsat 8 OLI (OperationalLandImager) y TIRS (ThermalInfrared Sensor) Level-1 Data Products.....	13
Tabla 1. Características de las bandas del Landsat 8 OLI/TIRS; según (Ironset al., 2012). .....	13
2. Índices de vegetación.....	14
3.2 Limitaciones de los índices de vegetación .....	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
Figura 1. Representación del muestreo aleatorio del agro ecosistema Mayarí. ....	19
Tabla 2. Imágenes utilizadas para la determinación de los índices de vegetación y las satélites que la toman según la (USGS-EROS, 2020). .....	20
<b>Landsat 8 OLI/TIRS Level-1 taProducts .....</b>	<b>20</b>
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	22
Tabla 3. Estadística descriptiva del NDVI y SAVI en los diferentes años analizados en el agro ecosistema Mayarí.....	22
Figura 2. Análisis de normalidad y distribución de los valores obtenidos en los diferentes años, en los índices espectrales NDVI y SAVI.....	23

Figura 3. Variación espacio temporal de los índices de vegetación calculados en diferentes períodos de tiempo para el agro ecosistema de Mayarí. .... 24

CONCLUSIONES..... 26

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 27

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad es muy común la utilización de modelos para diagnosticar la causa de los cambios climáticos observados en el pasado, sobre todo en relación a las influencias antropogénicas. Muchos de estos modelos se utilizan para formular recomendaciones de orden público referentes a decisiones ambientales de distinto tipo y, sobre todo, a aquellos vinculados a cambios en los procesos ecológicos globales, y que alteran el patrón natural del clima en distintas escalas.

Las actividades productivas del hombre sobre los sistemas naturales del planeta afectan al clima global, debido principalmente a la gran cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera terrestre, que afectan principalmente a los valores de la temperatura, afectando a la manifestación natural del clima, con efectos negativos diversos, sea por olas de calor, olas de frío, aumento de lluvias torrenciales, o disminución de la precipitación, entre otras.

De acuerdo con el IPCC (2014) el mayor problema del efecto invernadero es la gran absorción de radiación solar en la atmósfera, ya que el aumento de la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera impiden las pérdidas de la radiación (ondas largas e infrarrojas) hacia el exterior de la atmósfera terrestre (Londoño, 2006).

La vegetación es un importante indicador para evaluar diferentes procesos biofísicos en los ecosistemas; como por ejemplo los fenómenos relacionados a la pérdida de biodiversidad, desertificación, relación entre la vegetación y erosión del suelo e interacción vegetación-clima. Las técnicas de teledetección permiten analizar la distribución espacial y temporal del atributo analizado, proporcionando un método rentable en las estimaciones cuantitativas de la biomasa vegetal, tanto a escala local como regional (Darvishzadehet *al.*, 2014).

En 1960 Evelyn Pruitt aplica por primera vez el vocablo “teledetección” en su traducción inglesa “*remotesensing*”, para designar cualquier medio de adquisición de información a distancia de objetos, zonas o fenómenos sin necesidad de

contacto material con ellos. Multitud de datos en teledetección se adquieren diariamente en todo el mundo, desde satélites, plataformas aéreas con o sin tripulación o desde el suelo. Los usuarios de estos datos no se limitan sólo a los expertos de teledetección; más bien a cualquier usuario con una conexión a internet tiene libre acceso a las bases de datos globales o servicios (Markelin, 2013).

El potencial que ofrecen las imágenes obtenidas por teledetección proporciona a la agricultura de precisión información distribuida espacial y temporalmente con el fin de supervisar procesos agrícolas, y poder con ello evaluar con mayor precisión la densidad óptima de cultivo, estimar con mejores resultados los niveles de fertilización y predecir con mayor exactitud los volúmenes de producción (Van den Heuvel, 1996).

Entre las técnicas derivadas del uso de datos satelitales multiespectrales, se destacan el empleo de los índices de vegetación. Los índices de vegetación son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática, entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (Esperanza y Zerda, 2002). Estos índices están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales, sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación.

Ante esta situación se formula como ***problema científico***:

¿Cómo ha sido la variación espacio temporal de la vegetación en el municipio de Mayarí, a partir de la determinación por teledetección de índices de vegetación?

***Hipótesis de la investigación:***

La determinación de índices de vegetación mediante teledetección, permite indicar la variación espacio temporal de la vegetación del agro ecosistema Mayarí por efecto de factores climáticos.

***Objetivo general:***

Determinar mediante teledetección índices de vegetación del agro ecosistema Mayarí y su variación espacio temporal por efecto de factores climáticos.

***Objetivos específicos:***

- Determinar mediante teledetección los índices de vegetación del agro ecosistema Mayarí en diferentes años.
- Comparar los valores de los índices de vegetación del agro ecosistema de Mayarí en diferentes años.
- Evaluar la variación espacio temporal de la vegetación a partir de la incidencia de factores climáticos en el agro ecosistema de Mayarí.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### *1. Factores climáticos y su efecto en la vegetación*

Existen diferentes definiciones de clima. La más tradicional considera que el clima se puede definir como la descripción y clasificación de parámetros meteorológicos en un lugar de acuerdo al estado medio de la atmósfera. Es decir, que tiene en cuenta el comportamiento de diversos indicadores como el calor, contenido de humedad atmosférica, presencia y velocidad del viento (Smith y Romero, 2016).

De esta manera el clima hace referencia a las condiciones ambientales promedio que se esperan en un lugar durante un período prolongado de tiempo, que en muchos casos suelen durar años. En pocas palabras, el clima se define como las condiciones medias que se dan en un lugar durante varios años (Barry y Chorley, 1985).

El clima abarca los valores estadísticos de los elementos del tiempo atmosférico en una región durante un período de tiempo representativo: temperatura, humedad, presión, viento y precipitaciones. Estos valores se obtienen con la recopilación de forma sistemática y homogénea de la información meteorológica, durante períodos que se consideran suficientemente representativos, de 30 años o más, de esta manera se constituye lo que llamamos una serie temporal, cuantos más años tenga esa serie, mejor se podrán evaluar las características del clima, en distintas escalas espaciales: local, regional o global.

Estas épocas necesitan ser más largas en las zonas subtropicales y templadas que en la zona intertropical, especialmente, en la faja ecuatorial, donde el clima es más estable y menos variable en lo que respecta a los parámetros climáticos (Steinke, 2012).

En Cuba, los factores geográficos más importantes que influyen en el clima son las corrientes marinas y la distancia al mar, y junto con la configuración alargada y estrecha del país suavizan considerablemente la marcha de las principales

variables climáticas, entre las que se destacan la temperatura y la precipitación (Planos *et al.*, 2012).

La variación espacio temporal de los elementos climáticos; según Grove (1980): "es reconocido que los elementos climáticos, especialmente en los trópicos, varían en cortas distancias, de acuerdo con la topografía y con otras condiciones, las cuales no siempre son fáciles de tener en cuenta". Ciertamente, la mayoría de los modelos actuales son modelos no espaciales, pues se basan en el concepto de que un valor medido representa un área homogénea alrededor del punto evaluado, lo cual no siempre es cierto para el caso de grandes variaciones climáticas o topográficas (Hashmani, García y Fontaner 1995).

## ***2.Principalesfactores que influyen en las características de la vegetación***

La exposición de las plantas a un ambiente con restricciones hídricas durante varios estadios de su desarrollo hace activar múltiples cambios fisiológicos y bioquímicos en ellas (Araus, 2004).

En ambientes semiáridos, donde las altas temperaturas se unen a la escasez de las precipitaciones, que además no están distribuidas de manera homogénea a lo largo del año, hacen que cultivos los comerciales no se puedan concebir sin el apoyo del riego artificial. A pesar de ello, atendiendo a estas condiciones climáticas, estos cultivos pueden verse con frecuencia sometidos a condiciones de déficit hídrico (Loussert, 1992).

Desde el punto de vista fisiológico, el estrés hídrico en las plantas se manifiesta de varias maneras. Se inhibe el crecimiento vegetativo, observándose una disminución en el crecimiento de los brotes y en el desarrollo foliar y la disminución del perímetro del tronco (Ortuño *et al.*, 2004).

En las hojas se produce un cierre de estomas, la curvatura de los bordes de la hoja hacia el haz y la defoliación parcial. Se reduce el potencial osmótico y la conductividad en las estomas pero sin producirse un ajuste osmótico sino un ajuste

elástico en el que se incrementa la elasticidad de los tejidos ante la falta de agua (Ruiz *et al.*, 1997).

Y si se alarga ostensiblemente estas condiciones, puede llevar a daños importantes y marchitamiento de hojas. También se ha comprobado que el estrés hídrico reduce la producción, observándose sus efectos más significativos durante los estados fenológicos de floración y cuajado y desarrollo del fruto (Ginestar y Castel, 1996).

La evolución climática a nivel global apunta a una agricultura de regadío que se llevará a cabo cada vez más en condiciones de escasez de agua, y la gestión del riego debe pasar por mejorar la producción por unidad de superficie para maximizar la producción por unidad de agua consumida (Fererres y Soriano, 2007).

### **3. Teledetección o percepción remota en el estudio de la vegetación**

La detección remota y los sensores, tiene su origen en 1859 cuando Gaspard-Félix Tournachon tomó la primera fotografía aérea desde un globo aerostático. En los años siguientes, existe un gran desarrollo de la observación fotográfica desde el avión gracias al progreso en ópticas y emulsiones teniendo lugar en 1909 la primera fotografía aérea realizada por WilburWright. La primera cámara aérea propiamente dicha, se desarrolla en 1915 durante la Primera Guerra Mundial en 1915 por J.T.C. Moore-Brabazon.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se desarrollan las primeras películas en infrarrojo por Kodak ResearchLaboratories (Chuvienco, 2002). Posteriormente las primeras imágenes aéreas para la estimación de diferentes propiedades de la vegetación datan de 1956 (Keegan*et al.*, 1956) cuando se usaron películas infrarrojas en fotografía aérea para la detección de la “roya” del trigo.

En 1966 el Laboratorio de Teledetección Agrícola (LaboratoryforAgriculturalRemoteSensing) en Purdue University, Michigan, EEUU se utilizaron los primeros sensores multiespectrales aerotransportados con fines

agrícolas. Las primeras aplicaciones, de este tipo de sensores eran la identificación de cultivos (Hofjer, 1967) así como la detección de enfermedades como por ejemplo el tizón del maíz (Bauer *et al.*, 1971). En esta época ya se usaban sensores aerotransportados que contaban un número considerable de bandas en el rango espectral del ultravioleta al infrarrojo térmico.

En 1972 se lanzó el primer satélite de la serie ERTS (EarthResourcesTechnologySatellite) que posteriormente pasó a llamarse Landsat 1. Inicialmente era un satélite experimental con el que la NASA quería demostrar la operatividad de aplicaciones como la monitorización agrícola y medioambiental. El satélite incorporaba un sensor llamado MSS (MultiSpectral Scanner), que contaba con 4 bandas en el rango espectral del visible al infrarrojo cercano y una en el térmico, pensadas específicamente para la detección de propiedades de la vegetación.

A partir de los primeros resultados obtenidos de las imágenes de Landsat 1 se definieron una serie de requisitos de bandas, resolución espacial, tiempo de revisita, etc., pensando fundamentalmente en aplicaciones agrícolas y de monitorización ambiental. El resultado fue la creación del sensor TM (ThematicMapper), instalado a bordo de Landsat-4 y Landsat-5.

Durante los años 70 y 80 se desarrollaron los programas LACIE (LargeAreaCropInventoryExperiment) y posteriormente AgRISTARS (Agriculture and ResourcesInventorySurveysThroughAerospaceRemoteSensing) como un esfuerzo común entre distintos departamentos del gobierno estadounidense por desarrollar metodologías de teledetección que permitiesen identificar cultivos, así como determinar su estado o potencial producción a nivel regional a partir de datos provenientes de Landsat y otros sensores aerotransportados (Bauer, 1985). Estos programas permitieron definir las leyes físicas, tras las relaciones entre las medidas espectrales y las propiedades biofísicas de la vegetación y el suelo.

Durante estos años hasta la entrada del siglo XXI, se ha avanzado mucho en aspectos científicos en la teledetección, varios son los ejemplos de aplicaciones publicadas en diferentes campos como la clasificación de cultivos (Erol y Akdeniz, 1996; Grignettiet *al.*, 1997; PaxLenney y Woodcock, 1997), o su estado (Boissardet *al.*, 1993; Potdar, 1993; Blackmeret *al.*, 1994; Cleverset *al.*, 1994), las predicciones de cosecha y rendimiento (Tucker *et al.*, 1980; Rasmussen, 1992; Moran *et al.*, 1995; Clevers, 1997;), detección de arvences (Peña *et al.*, 2014), detección de enfermedades y deficiencias nutricionales (Malthus y Madeira, 1993; Adams *et al.*, 2000) o estimación de pigmentos fotosintéticos (Zarco *et al.*, 2005; Martin *et al.*, 2007).

### **1.1. Espectro electromagnético**

Históricamente las propiedades de la radiación electromagnética se ha explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio (teorías de Huygens y Maxwell), y aquella otra que considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones y cuantos, con la masa igual a cero (teorías Planck y Einstein). Las dos teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz presenta comportamientos que pueden explicarse de acuerdo a ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: Longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia ( $\nu$ ).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar, una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

- Espectro visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0,4-0,5  $\mu\text{m}$ ), verde (V: 0,5-0,6  $\mu\text{m}$ ), y rojo (R: 0,6-0,7  $\mu\text{m}$ ), es la única porción del espectro que podemos asociar al concepto de color.
- Infrarrojo: cubre la región entre 0.7 y 100  $\mu\text{m}$ , esta porción puede subdividirse en dos categorías basadas en las propiedades de la radiación: IR Reflejado y el IR térmico o emitido. El primero es utilizado en teledetección de manera similar al visible, y el IR térmico es diferente al visible e IR reflejado, ya que esta energía es esencialmente la radiación emitida por la superficie de la tierra en forma de calor.
- Infrarrojo cercano (IRC: 0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ) también se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales.
- Infrarrojo medio (IRM: 1,3 a 8  $\mu\text{m}$ ). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, hablamos de infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1,3 y 2,5  $\mu\text{m}$  y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda región de interés está comprendida entre 3 y 5 $\mu\text{m}$ , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 $\mu\text{m}$ ), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubiertas terrestres.
- Microondas (M, por encima de 1mm), con gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa (Chuvienco, 2002).

### **2.1.2. Radiación electromagnética**

La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz ( $300000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) transportando cantidades discretas de energía. Para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de esta.

Este flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de, o dirigida a, una unidad de superficie y con una dirección concreta, así, la radiancia se considera como el total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección, ya que describe precisamente lo que mide el sensor, se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estéreo-radián ( $\text{W}/\text{m}^2\text{sr}^{-1}$ ) (Chuvieco, 2008).

De cara a la identificación de objetos y procesos en la superficie terrestre, lo que nos interesa es la reflectividad (relación entre el flujo incidente y el que refleja una superficie) de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma diferente lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada. A partir de medidas de laboratorio se ha obtenido la reflectividad para las distintas cubiertas en diferentes longitudes de onda.

El gráfico que, para cada longitud de onda, nos da la reflectividad se denomina firma espectral y constituye una marca de identidad de los objetos. Resulta así fácil por ejemplo distinguir entre suelo y vegetación, e incluso entre diferentes tipos de suelo o diferentes tipos de vegetación.

La reflectividad en la nieve es muy alta especialmente en el visible, más en el caso de la nieve fresca. El agua, al ser el único elemento superficial capaz de transmitir radiación hacia abajo, tiene una reflectividad muy baja aunque muy dependiente de la longitud de onda. Absorbe casi toda la radiación que le llega en las bandas del infrarrojo próximo y medio.

La reflectividad aumenta algo en el visible especialmente en las bandas del azul y el verde. La turbidez del agua contribuye al aumento de la reflectividad en el verde y en el infrarrojo reflejado. La eutrofización del agua aumenta su reflectividad en el verde.

La vegetación tiene una reflectividad baja en el visible aunque con un pico en el color verde, la clorofila absorbe el rojo y el azul reflejando más en el verde. La reflectividad es muy alta en el infrarrojo reflejado o próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua contenida en la planta absorbe la energía.

Esta curva tan contrastada se debilita en el caso de la vegetación enferma en la que disminuye el infrarrojo y aumenta la reflectividad en el rojo y azul. Se observa también que la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta. Finalmente el suelo tiene una reflectividad relativamente baja para todas las bandas aunque aumentando hacia el infrarrojo.

### ***2.1.2. El efecto de la atmósfera sobre la energía electromagnética***

Al atravesar la atmósfera terrestre, la energía de ciertas longitudes de onda de la radiación solar se reduce considerablemente como ocurre con gran parte de la energía ultravioleta (0.001 a 0.4  $\mu\text{m}$ ) y algunas porciones del espectro infrarrojo (0.75 a 2.5  $\mu\text{m}$ ). En días de mucha nubosidad, la dilución atmosférica de energía en esas longitudes de onda es aún mayor.

Este efecto de la atmósfera (atenuación atmosférica) es producido particularmente por la presencia de partículas en suspensión. Las partículas, según su tamaño, afectan distintas longitudes de onda. El caso extremo son las nubes, las cuales pueden ocultar por completo el suelo, aunque cuando son tenues también afectan la transmisión de luz de una manera distinta según las longitudes de onda.

Partículas mucho más pequeñas afectan las longitudes de onda más cortas, y son particularmente comunes los casos de bruma. La facilidad de dispersión de la luz de este color es la que hace que el cielo diurno sea azul.

En teledetección hay que tener en cuenta un cuarto elemento, además del sensor, el objeto y el flujo electromagnético, la atmósfera que hay entre ambos. La energía solar incidente en nuestro planeta está cifrada en  $340 \text{ Wm}^{-2}$  (vatios.  $\text{m}^{-2}$ ). De toda ella, sólo  $173 \text{ Wm}^{-2}$  llegan a la superficie terrestre, este factor de reducción o albedo habrá de ser tenido en cuenta a la hora de interpretar la respuesta de los objetos.

En el trayecto seguido por la radiación electromagnética ésta sufrirá tres fenómenos principales:

- I. Absorción: Proceso por el cual las moléculas y partículas de la atmósfera absorben la energía radiante ( $65 \text{ Wm}^{-2}$ ) y la transforman en energía interna que posteriormente será emitida en el infrarrojo térmico. La atmósfera reduce así la observación espacial a ciertas bandas concretas del espectro, llamadas ventanas atmosféricas. Pero si lo que se pretende es estudiar la atmósfera (satélites meteorológicos), los sensores se diseñarán para captar la radiación precisamente en aquellos lugares donde la absorción atmosférica sea más alta.
- II. Dispersión: Este fenómeno se traduce en un re direccionamiento o pequeño desvío del camino recto de propagación. Es causado por la interacción entre la radiación y los gases y partículas atmosféricas. La reflexión consiguiente a ese choque, supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre. Se reduce por tanto la radiancia directa, aumentando la difusa. Los principales causantes son los aerosoles y el vapor de agua.
- III. Emisión: Como cualquier cuerpo con temperatura mayor que  $-273^\circ\text{K}$ , la Tierra emite su propia radiación, que lógicamente tiene mayor importancia

en el infrarrojo térmico. Por tanto, su efecto es fundamental si pretendemos trabajar en dicha banda del infrarrojo térmico.

## **2.2. Características de los sensores aerotransportados**

Los sensores aerotransportados hiperespectrales y multiespectrales pueden proporcionar resoluciones espaciales de 0,5 a 2 m y anchos de banda a partir de 2 nm en la región del espectro comprendida entre 300 y 2,500 nm.

Existen numerosos trabajos que demuestran el uso de sensores como el CASI (Compact AirborneSpectrographicImager) o el AVIRIS (Airborne Visible InfraredImagingSpectrometer) para la estimación de parámetros de vegetación como contenido clorofílico (Roberts *et al.*, 1997; Ustin *et al.*, 1998; Serrano *et al.*, 2000; Zarco *et al.*, 2004; Chenget *et al.*, 2006; Goodenough *et al.*, 2006; Hadi, 2015), contenido de materia seca (Jacquemoud *et al.*, 1996; Fourty y Baret, 1997; Riaño *et al.*, 2005), y estimación de parámetros estructurales como fracción cubierta e índice de área foliar (LAI) (Haboudane *et al.*, 2004).

De igual modo existen trabajos publicados que hacen uso de sensores aerotransportados con bandas en el térmico como el AHS (AirborneHyperspectral Scanner) y que han demostrado su utilidad en la detección de estrés hídrico en cultivos leñosos (Sepulcree *et al.*, 2007). Sin embargo, la aplicación de estos sensores sigue siendo casi exclusiva con fines científicos, sin producirse una transferencia de las metodologías desarrolladas a aplicaciones reales en el manejo de cultivos.

### **2.2.1. Características de Landsat 8OLI (OperationalLandImager) y TIRS (ThermalInfrared Sensor) Level-1 Data Products.**

Según Ironset *al.* (2012) las bandas del Landsat 8 OLI/TIRS tiene las siguientes características:

**Tabla 1. Características de las bandas del Landsat 8 OLI/TIRS; según (Ironset *al.*, 2012).**

Bandas	Rango Radiancia (nm)	Central	GSD (m)	SNR at reference L	Reference L (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> μm <sup>-1</sup> )	F0 (W m <sup>-2</sup> μm <sup>-1</sup> )
1 (Coastal/aerosol)	433–453	443	30	232	40	1895.6
2 (Blue)	450–515	483	30	355	40	2004.6
3 (Green)	525–600	561	30	296	30	1820.7
4 (Red)	630–680	655	30	222	22	1549.4
5 (NIR)	845–885	865	30	199	14	951.2
6 (SWIR 1)	1560–1660	1609	30	261	4	247.6
7 (SWIR 2)	2100–2300	2201	30	326	1.7	85.5
8 (PAN)	500–680	591	15	146	23	1724.0
9 (CIRRUS)	1360–1390	1373	30	162	6	367.0

*L8/OLI bands with wavelength, ground sampling distance, GSD, signal-to-noise ratio, SNR; at reference radiance, L, (Irons, Dwyer, & Barsi, 2012) and band average extraterrestrial solar irradiance, F0. Band averaged wavelengths are given in square brackets.*

## 2. Índices de vegetación

Las características de las plantas se han estimado desde los orígenes de la teledetección empleando diversas técnicas (Wiegand et al., 1979; Price y Bausch, 1995). Estas técnicas tienen la ventaja de proporcionar información sobre las plantas casi instantáneamente y de un modo no destructivo (Kokaly y Skidmore, 2015).

Los índices de vegetación son combinaciones de dos o más bandas que pueden ser calculadas a partir de las salidas del sensor: voltaje, reflectancia o conteos numéricos. Todos son correctos pero cada uno producirá diferentes valores del índice de vegetación para las mismas condiciones de observación (Jackson y Huete, 1991). Esta facilidad de cálculo ha hecho que los índices de vegetación sean ampliamente usados en la actualidad como una herramienta no destructiva para la estimación de variables biofísicas (Broge y Mortensen, 2002).

Un buen índice debe ser sensible a la variación de la variable estudiada, pero ser resistente (o verse mínimamente afectado) a otros factores como la atmósfera, el suelo, la arquitectura de la cubierta vegetal y la topografía (Datt, 1998). De acuerdo a los efectos que un índice es capaz de afrontar éste se clasifica en: intrínseco, resistente al suelo o resistente a la atmósfera.

Los índices de vegetación calculados a partir del (NIR) bandas de color rojo y el infrarrojo cercano, son buenos indicadores de la actividad fotosintética en la vegetación (Marino y Alvino, 2014).

El ratio de la reflectancia en la banda del infrarrojo (NIR, SWIR, MIR) y la reflectancia en el rojo ha demostrado ser adecuado para la estimación de biomasa, además de normalizar en parte el efecto de la variación en la reflectancia del suelo circundante (Colwell, 1973).

Las bandas del rojo y del NIR se han combinado en una relación matemática para indicar la presencia de clorofila y para minimizar la interferencia de otros elementos sin clorofila en la zona (Rouse et al., 1974).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Rouse *et al.*, 1974) se ha utilizado ampliamente como indicador del vigor de la biomasa vegetal, en estudios relacionados a comportamiento de cultivos, así como de vegetaciones boscosas naturales; sin embargo, muchas han sido las modificaciones de éste índice y se han desarrollado otros con el fin de corregir ciertas deficiencias, como por ejemplo, el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, (Huete, 1988) con el fin de minimizar el efecto del suelo en áreas con baja densidad de vegetación.

Ren y Zhou (2014) obtuvieron resultados más exactos usando nuevos índices, estimados a partir del índice SAVI, en zonas áridas o semiáridas y usando un factor de corrección "L" dependiendo del grado de cobertura de la vegetación (alto grado de cubrimiento  $L=0$  y bajo grado de cubrimiento  $L=1$ ). Usando  $L=0,5$  se minimiza las variaciones de brillo inducido del suelo y pueden reducir los problemas de ruido del suelo para una amplia gama de LAI (Huete, 1988).

Para simular las relaciones entre los índices de vegetación y parámetros biofísicos en superficie Goel y Qin, (1994) propusieron el índice de vegetación no lineal (NLI). Los índices de vegetación no lineales intentan linealizar las relaciones con los parámetros de superficie que tienden a ser no lineales.

### **3.2 Limitaciones de los índices de vegetación**

El Índice de Vegetación Normalizado NDVI es el índice de vegetación más utilizado para la evaluación de la erosión del suelo. Sin embargo, el NDVI tiene algunos problemas en la estimación de la cubierta vegetal, por ejemplo, este índice comienza a saturar cuando la cubierta vegetal es superior al 50% (Gill *et al.*, 2009), y o es sensible al verde cuando la cubierta vegetal es baja. Por este motivo puede sobre o subestimar la cubierta vegetal, dando información errónea en algunas zonas (Zhongming *et al.*, 2009).

La inestabilidad del NDVI puede deberse a variaciones en el color del suelo, estructura de la cubierta, propiedades ópticas de las hojas o condiciones atmosféricas (Boschetti *et al.*, 2007).

Además, el NDVI derivado de este modo se acerca asintóticamente a un nivel de saturación una vez que alcanza un determinado valor de biomasa o de índice de área foliar (LAI) (Sellers, 1985).

En el caso de trabajar con áreas donde esos valores de saturación no son habituales (zonas abiertas, semiáridas) los inconvenientes de utilizar estos ratios e índices de vegetación se minimizan, obteniéndose buenos modelos de estimación de capacidad de secuestro de carbono/biomasa a partir de imágenes hiperespectrales (Choet *al.*, 2007).

El problema de la iluminación; la compensación de los efectos atmosféricos no es perfecta con el NDVI, entre otras cosas porque los cambios atmosféricos no afectan todas las longitudes de onda de la misma manera. Por este motivo, se han desarrollado índices verdes que combinan los valores de reflectancia de modos no lineales, como ocurre en el Índice de Vegetación de Ambiente Global (GEMI) (Pinty y Verstraete, 1992).

Existen éste y muchos otros intentos de corregir el problema de la iluminación, pero si bien frecuentemente mejoran la precisión, suelen presentar algunas complicaciones para el cálculo o, por ser relativamente poco empleados, se desconoce el grado de corrección que aportan en distintas situaciones.

Sin embargo, en aplicaciones puntuales arrojan resultados más consistentes que los índices más comunes (Towers, 2002). El otro problema que se presenta con el uso de los índices verdes es la contaminación con respuestas espectrales provenientes del suelo cuando la cobertura no es alta. Si se está intentando evaluar de modo cuantitativo la información, y la respuesta del suelo presenta problemas, existen algunas salidas como emplear un índice verde corregido por el efecto del suelo, como el Índice de Vegetación Perpendicular PVI (Richardson y Wiegand, 1977), o el Índice de Vegetación Ajustado por Suelo Transformado TSAVI (Baret y Guyot, 1991).

En ambos casos se estudia la llamada “línea de suelo” y se determina la distancia perpendicular desde esta línea hasta el valor total de reflectancia en rojo y NIR. Efectivamente lo que se realiza es restar la reflectancia propia del suelo del valor total de reflectancia, y se presume que la diferencia se debe a la vegetación (Towers, 2002).

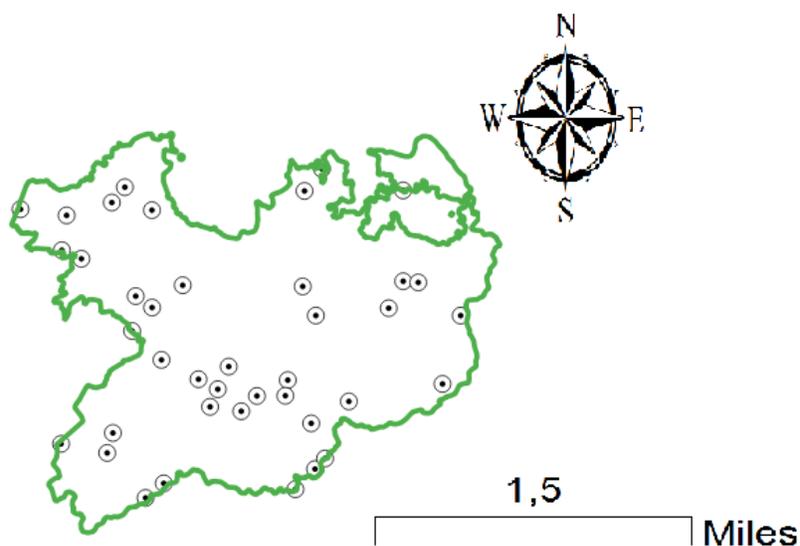
Otra opción es, identificar sobre el terreno lotes con cobertura vegetal total y suelos desnudos, y se determina, para cada pixel, la proporción de cada respuesta que lo compone, es decir se separan la proporción de pixel cubierta por vegetación y la del suelo (desmezclado del pixel).

Sin embargo, aún con coberturas parciales, es común que la contaminación por suelo sea menor de lo que se espera. Esto es así porque la inclinación solar, y el ángulo de observación, son tales que el suelo no se observa. Obviamente, si el sol iluminase desde el cenit, y también desde allí se realizara la teledetección, un cultivo con 70 % de cobertura devolvería un 70 % de respuesta proveniente de la vegetación y un 30 % proveniente del suelo. Pero la luz alcanza al cultivo en diagonal, y salvo con coberturas muy bajas, o surcos muy anchos, generalmente interactúa con la vegetación antes de alcanzar el suelo. Es por este motivo que el NDVI no aumenta por encima de coberturas del orden del 80 % (Towers, 2002).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El agro ecosistema Mayarí se encuentra ubicado en el municipio de igual nombre en la provincia de Holguín. Se destaca por desarrollarse en este agro ecosistema el mayor polo agroproductivo de la provincia de Holguín, con el desarrollo del Trasvase Este-Oeste para el incremento de las áreas bajo riego para la producción de alimentos.

Un buen índice debe ser sensible a la variación de la variable estudiada, pero ser resistente a otros factores como la atmósfera, el suelo, la arquitectura de la cubierta vegetal y la topografía (Datt, 1998). Para la detección de los cambios en la vegetación en el agro ecosistema Mayarí, se realizó un muestreo completamente aleatorizado sobre una capa vectorial a una distancia entre puntos de 1 kilómetro para un total de 40 (Figura 1).



**Figura 1. Representación del muestreo aleatorio del agro ecosistema Mayarí.**

La descarga de las imágenes se realizó del sitio [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov) del Servicio Geológico de los Estados Unidos, en la cuadrícula correspondiente al 011/046. Las imágenes provienen de satélites comerciales del tipo Landsat como se muestra en la Tabla 2. El sistema de proyección geográfica utilizado fue el WGS/UTM Zona 18 Norte, en el software QGis versión 3.10 A Coruña; se realizó

la corrección radiométrica con el complemento PCI, el cálculo de los índices de vegetación y la información estadística descriptiva en la opción “Información de la capa raster”.

**Tabla 2. Imágenes utilizadas para la determinación de los índices de vegetación y las satélites que la toman según la (USGS-EROS, 2020).**

Imágenes	Satélites
LT05_L1TP_011046_19970107_20170101_01_T1	Landsat 5 (TerrainCorrection) Level 1
LC08_L1TP_011046_20160112_20170405_01_T1	Landsat 8 OLI/TIRS Level-1 taProducts
LC08_L1TP_011046_20200123_20200128_01_T1	

Se calculó el índice Normalizado de Diferencia Vegetativa (NDVI) a partir de la expresión descrita por Rouse *et al.* (1973), para la cual se utilizan las bandas del espectro rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) de la imagen captada por los sensores como se aprecia en la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \text{ (Expresión 1)}$$

Luego de realizar el cálculo del NDVI se procedió a determinar el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) según la expresión planteada por (Wilson *et al.*, 2016).

$$SAVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)} (L + 1) \text{ (Expresión 2)}$$

Donde el parámetro “L” puede tomar valores entre 0 y 1, en dependencia de la densidad de la vegetación (valores más altos para densidades más bajas). Para mantener el mismo rango de variación que el NDVI, el resultado debe multiplicarse

por  $L+1$ . Las ecuaciones para el cálculo de SAVI necesitan del parámetro “L”, este puede ser extraído en el espacio R-NIR o de las imágenes y es el valor, en la banda del rojo, del brillo del suelo más común en el área medido sobre la “línea de los suelos”, el cual según Huete (1988) puede utilizarse como coeficiente el valor de 1 para un valor intermedio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 ilustra la estadística descriptiva de los índices espectrales determinados. De manera teórica el NDVI tiene una variación de -1 la cual corresponde a áreas con bajo nivel de vegetación y 1 al estado de alta densidad de especies vegetales.

**Tabla 3. Estadística descriptiva del NDVI y SAVI en los diferentes años analizados en el agro ecosistema Mayarí.**

Años	Variable	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx	Mediana
1997	NDVI	-0,02	0,09	0,01	23,21	-0,14	0,28	-0,05
1997	SAVI	-0,03	0,13	0,01	22,31	-0,21	0,41	-0,08
2016	NDVI	0,25	0,06	0,01	22,04	-0,03	0,41	0,26
2016	SAVI	0,38	0,08	0,01	22,04	-0,05	0,61	0,38
2020	NDVI	0,26	0,06	0,01	24,02	-0,09	0,36	0,28
2020	SAVI	0,40	0,09	0,01	24,02	-0,13	0,55	0,42

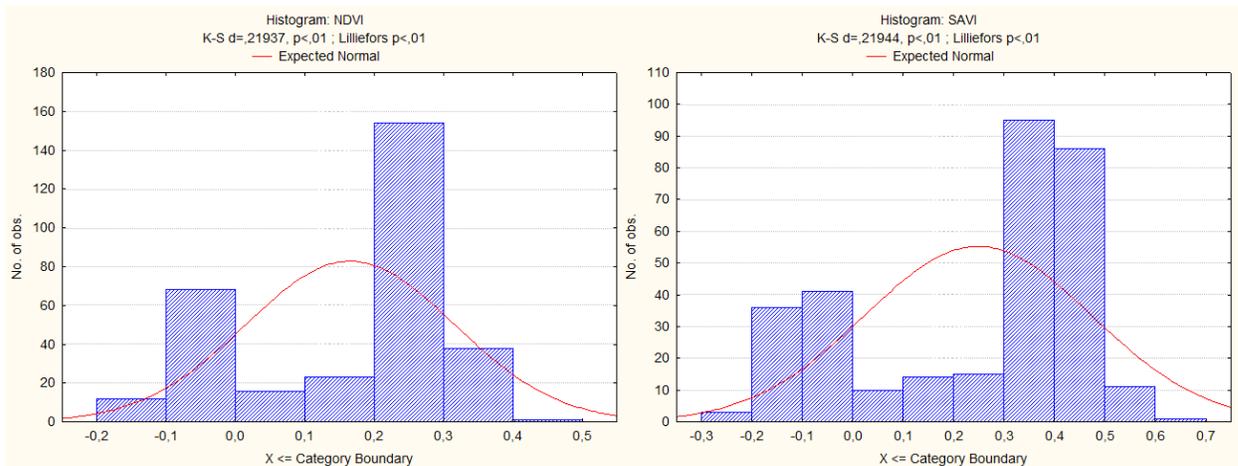
Al tomar como referencia los valores del SAVI; el cual ajusta los valores de las bandas roja e infrarroja cercana del NDVI; se muestra que la presencia de escasa vegetación fue mayor para el año 1997 con un ligero incremento en los años 2016 y 2020 con valores de 0,38 y 0,40 según la clasificación planteada por (Rawashdeh, 2012).

Las imágenes del índice de vegetación obtenida por la técnica SAVI son recomendadas por Huete (1988) para el seguimiento de la cobertura vegetal, principalmente cuando el índice NDVI satura en sus valores máximos (Jackson y

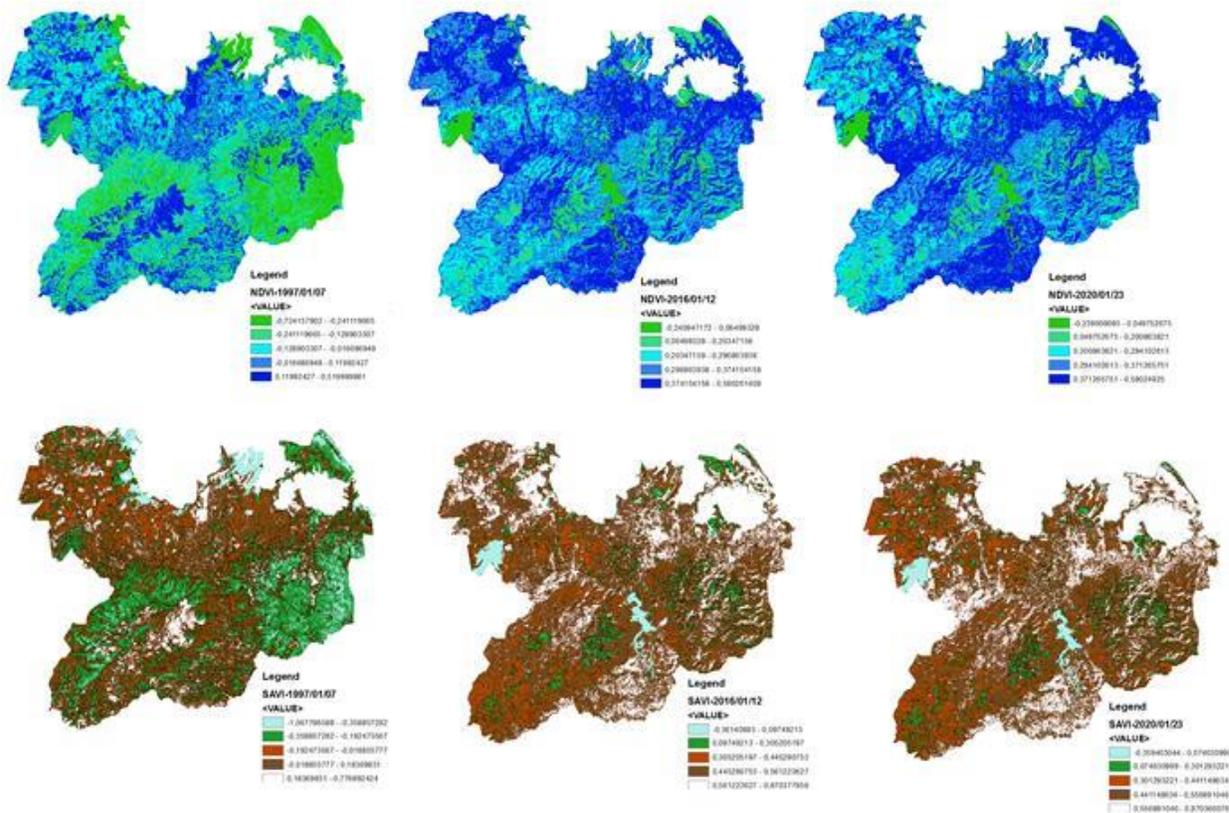
Huete, 1999), esta saturación, o pérdida de la sensibilidad, del valor del índice ocurre principalmente en cultivos en suelos agrícolas oscuros.

En el estudio realizado por Castellanos *et al.* (2016), plantea que el SAVI es altamente correlacionado con la dinámica de la cobertura vegetal y fue obtenido en base a una mejora del NDVI con un coeficiente correspondiente al valor del suelo en las imágenes (Huete y Glenn, 2011).

Para el caso de estudio de índices de vegetación del agro ecosistema de Mayarí, se pudo apreciar que no existe una distribución normal con una fuerte variación espacio temporal (Figura 2), la cual puede estar dada por el cambio climático que azota al mundo, con la disminución de los períodos de lluvia y el alza de las temperaturas, los cuales tienen marcada incidencia en el desarrollo fenológico de los cultivos.



**Figura 2. Análisis de normalidad y distribución de los valores obtenidos en los diferentes años, en los índices espectrales NDVI y SAVI.**



**Figura 3. Variación espacio temporal de los índices de vegetación calculados en diferentes períodos de tiempo para el agro ecosistema de Mayarí.**

Meeraet *al.* (2015) refiere que el decrecimiento del contenido de agua en el suelo por diversas razones en el ecosistema existe una tendencia a disipar el verdor de los cultivos y por ende los valores del NDVI.

La reflectividad de las cubiertas vegetales viene determinada, por características ópticas y distribución espacial de todos sus constituyentes, los cuales incluyen el suelo sobre el que se asienta la vegetación, así como por sus proporciones (Gilabert *et al.*, 1997).

Una de las causas de la variación del estado de la vegetación se encuentra por la absorción de la energía (radiación electromagnética absorbida en el interior del sensor). Esta energía es un proceso que está cuantizado, dichos rasgos se

encuentran localizados en longitudes de onda concretas, que dependen de la presencia de determinados componentes en el material (Baret, 1995), así por ejemplo, los rasgos que son consecuencia de transiciones electrónicas como los debidos a la presencia de óxidos de hierro o a la presencia de clorofila se localizan en la región visible del espectro, mientras que los debidos a transiciones de tipo rotacional como los del ion  $\text{OH}^-$  se producen en la zona del infrarrojo cercano.

Xie *et al.* (2008) describe que el mapeo y clasificación de la vegetación mediante sensores remotos es una importante técnica para el manejo de los recursos naturales y de la providencia de la vegetación ante la afectación del cambio climático global y el secuestro del dióxido de carbono. En su análisis realizado al utilizar el mapeo de la vegetación para presentó información referida a la cuantificación de los cambios en ecosistemas naturales y agro ecosistemas por efecto de las sequias, la presencia de cobertura vegetal a grandes escalas en cinco períodos de tiempo continuos.

## **CONCLUSIONES**

Los índices de vegetación determinados muestran la variación espacio temporal del estado de la vegetación a lo largo de los períodos de tiempo analizados. Para el caso del NDVI sus valores presentan de forma general una variación de -1 para áreas con bajo nivel de vegetación y el de 1 para altas densidades de especies vegetales. Los valores SAVI ajusta los valores de las bandas roja e infrarroja cercana del NDVI; con un incremento de la escases de vegetación en los años 2016 y 2020 con valores de 0.4268 y 0.5031.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anaya, Jesús y Valencia, Germán. (2013). Fenología de ambientes tropicales en el marco de la teledetección. *GeoFocus*, ISSN: 1578-5157; 13(2): 195-211.
- Broge, N.H. y Mortensen, J.V. (2002). Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens. Environ*, 81: 45-57.
- Chuvioco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*, Ariel Ciencia, 128 pp.
- Datt, B. (1998). Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in Eucalyptus leaves. *Remote Sens. Environ*. 66:111-121.
- Green, Stuart.; Cawkwell, Fiona y Dwyer, Edward. (2018). A time domain NDVI anomaly service for intensively managed grassland agriculture. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17: 1-30.
- Huete, A. R. y Glenn, E. P. 2011. Remote Sensing of Ecosystem and Function. En: Weng, Q. *Advances in Environmental Remote Sensing*. London: CRC Press. 600p.
- Jackson, R.D. y Huete, A. R. 1991. "Interpreting vegetation indices". *Preventive Veterinary Medicine*, Volume 11, Pages 185-200.
- Ke, Y.; Im, J.; Lee, J.; Gong, H y Ryu, Y. (2015). Remote Sensing of Environment, 164: 298.
- Meer, F. y Jong, S. (2002). *Imaging Spectrometry. Remote Sensing and Digital Image Processing*. Kluwer Academic Publishers. 4: 111-197.
- Rawashdeh, S. B. A.: Assessment of Change Detection Method Based on Normalized Vegetation Index in Environmental Studies. *International Journal of Applied Science and Engineering*. 10, 2: 89-97, 2012.

- Ross, J. (1981). *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dr W. Junk Publishers, London.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: NASA Special Publication. 351. pp. 309.
- Slatyer, R.O. (1967). *Plant-Water Relationships*. Academic Press, London.
- USGS-EROS. 2020. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Landsat Archives. DOI: Landsat 1-5 MSS Digital Object Identifier (DOI) number: /10.5066/F7H994GQ y Landsat 8 OLI/TIRS Digital Object Identifier (DOI) number: /10.5066/F71835S6.
- Viña, A.; Gitelson, A.A.; Nguy-Robertson, A.L y Peng, Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115: 3468-3478.
- Wilson, N.R., Norman, L.M., Villarreal, M., Gass, L., Tiller, R., Salywon, A. 2016. Comparison of remote sensing indices for monitoring of desert cienegas. *Arid Land Research and Management*, 30(4), 460-478. [doi.org/10.1080/15324982.2016.1170076](https://doi.org/10.1080/15324982.2016.1170076)
- Xie, Yichun.; Sha, Zongyao y Yu, Mei. 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 1(1): 9–23. Doi: 10.1093/jpe/rtm005.
- Aguilera, M y Martínez, R.(1996). *Relaciones agua suelo planta atmósfera.*, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo. pp. 256.
- Alejo, Gelasio., Salazar, Fredy., García, J., Arrietta, Beatriz., Jiménez, Víctor y Sánchez, Ana. (2012). Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Launillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15:323-328.

ALEXAKIS, D.D.; MEXIS, F.D.K.; VOZINAKI, A.E.K.; DALIAKOPOULOS, I.N.; TSANIS, I.K.: "Soil moisture content estimation based on Sentinel-1 and auxiliary earth observation products. A hydrological approach. Sensors, 17: 1-16, 2017, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s17061455>.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M.: Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Ed. Food & Agriculture Org., @FAO ed., vol. 56, 2006, ISBN: 92-5-304219-2

Alvarez, Jorge. (2002). Caracterización y manejo de los principales factores edáficos limitantes de la agroproductividad de los suelos., Universidad Camilo Cienfuegos, Facultad de Agronomía, Matanzas, Cuba. pp. 31.

Alzate, B. (2001). Imágenes Espaciales de la Superficie Terrestre. Procesamiento Digital, Análisis y Extracción de la Información Temática. Bogotá, Colombia.

AMANI, MEISAM.; PARSIAN, SAEID.; MIRMAZLOUMI, S.; Aieneh, Omid.: "Two new soil moisture indices based on the NIR-red triangle space of Landsat-8 data", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 50: 176-186, 2017, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.018>.

Andriotti, S. (2010). Fundamentos de Estadística e Geoestatística. São Leopoldo: Editora Unisinos. ed., Brasil.

Aponte, J y Ospina, J.E. (2019). Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos. Revista de Teledetección, ISSN 1133-0953; 53: 59-72. [doi.org/10.4995/raet.2019.10580](http://doi.org/10.4995/raet.2019.10580)

BAO, YANSONG.; LIN, LIBIN.; WU, SHANYU.; KWAL, KHIDIR.; PETROPOULOS, GEORGE.:  
"Surface soil moisture retrieval over partially vegetated areas from the synergy

of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model", *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 72 : 76-85, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.026>.

Basterra, I. (2011). Cátedra de fotointerpretación departamento de geociencias Facultad de Ingeniería- UNNE. <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/tdi.pdf>

Becerra, Carolina., Madero, Edgar., Herrera, Oscar y Amézquita, Edgar. (2005). Caracterización espacial de la compactación en terrenos agrícolas de CIAT, Colombia. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG* 8:33-37.

Bense, T. 2007. Tutorial - Introducción a la Percepción Remota. Sextas Jornadas de Educación en Percepción Remota en el Ámbito del Mercosur y Primeras Uruguayas, noviembre 2007.

Bocco, M., Heredia, S., Ovando, G., Sayago, S., Willington, E. (2009). Estimación de cobertura vegetal con redes neuronales a partir de imágenes de distintos satélites. In: X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, Rosario, pp. 1250–1256.

Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S., Willington, E. (2014). Modelos simples para estimar cobertura de suelo agrícola a partir de Imágenes MODIS: aplicación a la zona central de Córdoba (Argentina). In: 42 JAIIO Congreso Argentino de AgroInformática, CAI 2013, Córdoba, pp. 61-69.

Bravo, C., Cabrera, J., Carvallo, M., Cánchica, H., Ramírez, E y González, I. (2008). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con el rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata* L.) en una parcela experimental de los llanos centrales venezolanos. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. 10:79-84.

- Cairo, P y Fundora, O. (2005). Edafología. Editorial Félix Varela 2<sup>da</sup> Edición, 1<sup>ra</sup> reimpresión. ed., La Habana, Cuba.
- CHAMPAGNE, C.; ROWLANDSON, T.; BERG, A.; BURNS, T.; L'HEUREUX, J.; TETLOCK, E.; ITENFISU, D.: "Satellitesurfacesoilmoisturefrom SMOS and Aquarius: assessmentforapplications in agriculturallandscapes", Int. J. Appl. EarthObs. Geoinf, 45, 143-154, 2016.
- CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; ELENA RUIZ, M.: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 20(2): 42-46, 2011, ISSN: 1010-2760, EISSN: 2071-0054.
- Cid, Greco.; Herrera, Julián.; López, Teresa.; González, Felicita .:"Estimación del agua disponible para las plantas en suelos cubanos en función de la textura predominante", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 27(4): 1-7, 2018, E-ISSN: 2071-0054.
- CID, GRECO.; HERRERA, JULIÁN.; LÓPEZ, TERESA.; GONZÁLEZ, FELICITA.: "Resultados de algunas investigaciones en suelos Vérticos de Cuba", Revista Ingeniería Agrícola, 6(2): 51-56, 2016, ISSN-2306-1545.
- Clark, I. (1979). Practical geostatistics. London: Applied Science Publishers.p.129 .
- Corella, T., Andérez, M., Taboada, M. M y Taboada, M. T.(2002). Principales aspectos edafológicos de la provincia de Holguín (Cuba). Uso y manejo de los suelos. Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña 27:103-115.
- Cuador, J. (2002). Elementos de Geoestadística, Departamento de Informática, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba. pp. 52.
- Andreola, F.; Costa, L. M. & Olszewski, N. Inflência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de

uma Terra Roxa estruturada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 24 (4):857-865, 2000.

Soane, B. D. The role of organic matter in soil compatibility: A review of some practical aspects. *Soil Till. Res.* 16:179-201, 1990.

Buol, S. W. & Stokes, M. L. Soil profile alteration under long-term, high-input agriculture. In: R. J. Buresh, P. Sánchez and F. Calhoun, eds. *Replenishing soil fertility in Africa*. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. SSSA Special Publication Number 51. p. 97-109, 1997.

Devine, S.; Markewitz, D.; Hendrix, P. & Coleman, D. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades. *PLoSOne*. 9 (1):1-12, 2014.

Spera, S. T.; Santos, H. P.; Fontaneli, R. S. & Tomm, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 28 (3):533-542, 2004.

Vieira, M. L. & Klein, V. A. Propiedades físicohídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 31:1271-1280, 2007

CUMBRERA, RAMIRO.; ROMAGOSA, WILFREDO.; MILLÁN, HUMBERTO.; SORIA, ANIER.; GASKIN, BENJAMÍN.: "Estimación de la dependencia espacial del contenido de humedad de un Vertisol", *Revista Ingeniería Agrícola*, 5(2): 16-22, 2015, ISSN-2306-1545, RNPS-0622.

De Miguel, Constantino y Sánchez, Yumisledis. (2011). Factores hidrogeológicos que influyen en la salinidad de los suelos: ejemplo del estudio Valle del Cauto provincia Holguín. *GEO 12-P5* 30:14.

- FAO. (1995). Comercio internacional, medio ambiente y desarrollo agrícola sostenible. En: El estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación., Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación., Roma, Italia.
- Forsythe, W., Sancho, F y Villatoro, M. (2005). Efecto de la compactación de suelos sobre elrendimiento del maíz en tres localidades de CostaRica. *Agronomía Costarricense* 29(3):175-185.
- González, T., Díaz, M. (2003). Módulo de geoestadística para Excel: aplicación a pesca. En: VI Congreso Gallego de Estadística e Investigación de Operaciones. Disponible en Internet: <http://eioweb.uvigo.es/visgapeio/8>
- HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.; PÉREZ JIMÉNEZ, J.M.; BOSCH INFANTE, D.; CASTRO SPECK, N.: "Clasificación de los suelos de Cuba". INCA Ediciones, San José de Las Lajas, Cuba. 91 p, 2015.
- Hernández, A., Llanes, Violeta., López, Dagoberto y Rodríguez, Jesús. (2014). Características de Vertisoles en áreas periféricas de La Habana. *Cultivos Tropicales*, 35:68-74.
- Hernández, E (2015). Uso del NDVI para Determinar Impactos Ambientales en la Vegetación Ocasionados por la Intervención del Hombre Mediante Técnicas de Percepción Remota. Universidad Nacional autónoma de México.
- Hernández, J y Montaner, D (2009). Patrones de respuesta espectral, En: Lab. Geomántica y ecología de paisajes, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile.
- HERNÁNDEZ, YUNAY.; MEDINA, HANOI.: "Estimación de la humedad del suelo mediante técnicas de asimilación de datos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(4): 30-35, 2012, ISSN-1010-2760, RNPS-0111.

HWAN, SEOK.HEON,DAE.; HOON, JOONG.:”A new measureforassessingtheefficiency of hydrological data-drivenforecastingmodels”, HydrologicalSciencesJournal, 57(7): 1257-1274, 2012, DOI: 10.1080/02626667.2012.710335.

Iqbal, J., Thomassom, A., Jenkins, J. N.; Owens, P. R y Whisler, F.D.(2005). Spatial variability analysisof soil physical properties of alluvial soils. Soil Sci.Soc. Am. J. 69:1338-1350.

Jaramillo, D. (2011). El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad.Universidad Nacional de Colombia, Medellín, pp. 533.

Jaramillo, D.F. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Medellín, Colombia.

Jordan, A. (2006). Manual de Edafología., Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla, Sevilla, España. pp. 143.

KLIMES, A.S.; SUÁREZ, O.; MESA, A.; PENA, J.: Suelos de Cuba, Ed. Orbe, Tomo II. Física del suelo ed., La Habana, Cuba, 328 p., 1980.

Lodoño, Daniel y Moreno, Jhon. (2014). Cuantificación de la variabilidad espacial de suelos en un huerto cítrícola en el departamento de Caldas., Facultad de Ciencias e Ingeniería Universsidad de Manizales, Colombia. pp. 38.

Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, M., Moreno, B., Piñango, L y Villanueva, J. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. Bioagro 16:61-72.

MOHAMMADI, A.; COSTELLOE, J.F.; RYU, D.: “Application of time series of remotelysensednormalizeddifferencewater, vegetation and moisture indices in characterizingfloordynamics of largescalearidzonefloodplains”, Remote

Sensing of Environment, 190, 70-82, 2017, DOI:  
doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.003.

Moreira, B. (2014) Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul.. Revista Brasileira de Ciência do Solo 38:1565-1575.

Mulla, D. (2012). Chapter 20 - Modeling and Mapping Soil Spatial and Temporal Variability. En: LIN, H. (ed). *Hydrogeology*. Academic Press (Boston). p.637-664.

NAKAIDZE, E.K.; SIMEÓN, F.R.: "Características generales de las propiedades hidrofísicas de los principales suelos de Cuba", *Voluntad Hidráulica*, (23): 33-40, 1972, ISSN: 0505-9461, E-1999-2750.

Narváez, M., Combatt, E y Bustamante, I. ( 2014). Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río Sinú (Córdoba, Colombia). *U.D.C.A Act. & Div. Cient* 17:433-443.

Olivera, Dilier. (2012). *La Degradación de los Suelos en Cuba*, Juan José Ibáñez, Cuba.

Ortega, Rodrigo y Flores, Luis. (1999). *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico* CRI Quilamapu INIA. Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente Chillán, Chile. pp. 13-46.

Otero, Lázara., Morles, Roberto y Vento, Mirna. (2011). Salinidad del suelo: un problema que incumbe a todos. *Agricultura Orgánica* 1:1-2.

Ovalles, V., F, A. (1991). Evaluación de la variabilidad de suelos a nivel de parcela, para el establecimiento en lotes comerciales en el estado Cojedes. En: *Agronomía Tropical*. Vol. 41, no. 1; p. 5-22.

- PATIL, N. G.; SINGH, S. K.:  
“Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties: A review.  
pedosphere 26(4): 417-430, 2016, Doi:10.1016/S1002-0160(15)60054-6.
- Paz, A., Gómez, M y Taboada, M. (1996). Análisis geoestadístico de las propiedades generales de un suelo de cultivo. En: Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales. Vol. 11, no.1; p. 133-160.
- Ponce De León, D.; Pablos, P.; Balmaseda, C. y Henriquez, M. (1999). Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestreos de suelos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar en Cuba. En: Bioagro. Vol. 11, no. 1; p.9.
- QIU, JIANXIU.; CROW, WADE.; WAGNER, WOLFGANG.; ZHAO, TIANJIE.: “Effect of vegetation index choice on soil moisture retrievals via the synergistic use of synthetic aperture radar and optical remote sensing”, Int J Appl Earth Obs Geoinformation, 80: 47-57, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.015>.
- Ramírez, L. A., Sánchez, Reina y Camacho, J. H. (2008). Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. Eng. Agric. 28(1):55 - 63.
- REY, R.; HERRERA, J.; ROQUE, R.; LAMELA, C.: “El pronóstico de riego en Cuba.”, Ciencia y Técnica en la Agricultura. Riego y Drenaje, 5(1): 10-15, 1982, ISSN: 0138-8487.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J y Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del Suelo, Universidad de la República de Uruguay, Facultad de Agronomía, Uruguay. pp. 68.
- Ruiz, Jesús. (2008). Aplicación de técnicas hiperespectrales a imágenes multiespectrales (aster), para identificar superficies cultivadas con maíz, en

la localidad de Sabaneta, estado Barinas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Postgrado en Ciencia del Suelo, Especialización en Geomántica. Pp: 84.

Salgado, E. (2001). Relación suelo-planta-agua., Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso., Valparaíso. pp. 25.

SILVA, F.R.; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A.; FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C.; WARMLING, M.I.: “Physical properties of a hapludox after three decades under different soil management systems”, Rev Bras Cienc Solo, v40:e0140331, 1-14, 2016, DOI: 10.1590/18069657rbc20140331.

SIMEON, F.R.: “Características de las propiedades hidrofísicas de los principales suelos agrícolas de Cuba”, Voluntad hidráulica, 16(49-50): 16-23, 1979, ISSN: 0505-9461, E-1999-2750.

SINGH, KISHAN.; KUMAR, SUDHIR.; KUMAR, RAJ.: “Synergetic methodology for estimation of soil moisture over agricultural area using Landsat-8 and Sentinel-1 satellite data”, Remote Sensing Applications: Society and Environment, 15:1-8, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100250>.

Telesat (1999), Sistema para el seguimiento y análisis de tierra mediante la teledetección. En: Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Tipantuña, Lizeth. (2017). Propuesta metodológica para el análisis de la respuesta espectral en plantaciones de banano a la presencia de plagas y enfermedades, caso de estudio: cantón San Jacinto de Yaguachi, Sector Tres Postes, Provincia del Guayas. Disertación previa a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa en Gestión Ambiental. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Pp:144.

- Torrente, A. (2013). El Suelo - Propiedades Físicas. Universidad Surcolombiana. Neiva ed., Colombia.
- Torres, C., Gutiérrez, María., Ortiz, Carlos y Gutiérrez, Edgar.(2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México. Terra Latinoamericana 34: 457-466.
- Vázquez, Jose.(2009). Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena., Covenio Universidad del Magdalena, Maestria en Ciencias Agrarias con énfasis en suelos., Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia. pp. 7.
- Villazón, J., Martín, George y Cobo, Yakelín.(2017). Análisis multivariado de las propiedades químicas de los suelos pardos erosionados. Centro Agrícola 44:56-62.
- Wang, J., Li, X., Lu, L., Fang, F. (2013). Estimating near future regional corn yields by integrating multi-source observations into a crop growth model. Eur. J. Agron. 49:126-140.
- WILSON, M.; CERANA, J.: "Mediciones físicas en suelos con características vérticas", Revista Científica Agropecuaria, (8): 11-22, 2004, ISSN-0329-3602
- WRB. (2006). World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication., in: W. S. R. Report (Ed.), IUSS-ISRIC and FAO (International Union of Soil Sciences-Information Soil Reference and Information Centre and Food and Agriculture Organization). Rome, Italy.

ZHAN, Z.; QIN, Q.; GHULAN, A.; WANG, D.: "NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring", Sci. China Ser. D: Earth Sci, 50 (2), 283-289. 2007.

ZHANG, J.; ZHOU, Z.; YAO, F.; YANG, L.; HAO, C.: "Validating the modified perpendicular drought index in the north China region using in situ soil moisture measurement", IEEE Geosci. Remote Sens. Lett, 12(3), 542-546.

Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ. 25 (3), 295 -309.

BARET, F. 1995. Use of spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical characteristics. Danson, F. M. and Plummer, S. E. (eds.) Advances in Environmental Remote Sensing. John Wiley & Sons. Ltd. ch.3.

Gilabert, M. A., González, J y García J. 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. Revista de Teledetección, (8): 1-10.

Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Barcelona. Ariel Ciencia. 584 pp. ISBN 978-84-344-8073-3.

Chuvieco, E. 2008. Teledetección Ambiental 3ra edición. Barcelona España: Editorial Ariel S.A. 595 p. ISBN 978-84-344-8073-3.

Meera, G., Parthiban, S., Thummalu, Nagaraj y Christy, A. 2015. NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and GIS-A case study of Vellore District. Procedia Computer Science, 57: 1199-1210.

Castellanos, G., Moreno, M y Maldonado, F. D. 2016. Obtención de imágenes índice de vegetación SAVI a partir de imágenes de reflectancia TOA. Conference Paper. Consultado en: <https://www.researchgate.net/publication/311442359>.

