

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES Y AGROPECUARIAS**

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

**Título: Teledetección de la humedad presente en la
fenología del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) y su
relación con el estado de la vegetación y suelo.**

Autora: Solangel Moyé López

Tutores: Ing. Roberto Alejandro García Reyes

Dr.C. Mario Damian González Posada-Dacosta

Ms. C. Juan Alejandro Villazón Gómez

Holguín 2021

Resumen

El uso de técnicas de teledetección para la estimación del estado de humedad de los cultivos, se ha presentado como una herramienta para la toma de decisiones en la agricultura contemporánea. La presente investigación tuvo como objetivo la determinación de la relación entre la humedad de la vegetación y del suelo en diferentes etapas fenológicas, mediante teledetección en un agroecosistema arrocero de Mayarí, Holguín. Se utilizó el software ArcGis 3.10 para la determinación de los índices espectrales y la corrección radiométrica de las imágenes multiespectrales obtenidas del satélite Landsat 8 OLI/TIRS de la zona 011/046 WGS84 /UTM 18 N del municipio de Mayarí conocida como "Los Chinos. Para el análisis se confeccionó una grilla de muestreo completamente aleatorizado con puntos cada 50 metros de distancia, los cuales se extrajeron los valores tomados en cada píxel y tratados en el software STARGRAPHIC 5.0 mediante análisis de regresión lineal simple. Los resultados obtenidos mostraron una alta correlación y determinación con valores cercanos a 1,00 de la relación LSWI-NDVI, LSWI-EVI y LSWI-SAVI donde los mapas ilustraron una alta heterogeneidad de dichos índices en el espacio y tiempo en que se realizó la siembra hasta la cosecha del grano en el área de estudio. Se concluye que existe una alta relación entre la humedad presente en el cultivo con los índices que establecen el estado de la vegetación y del suelo, mediante la aplicación de técnicas de teledetección en áreas arroceras del municipio de Mayarí.

Abstract

The use of remote sensing techniques to estimate the moisture status of crops has been presented as a tool for decision-making in contemporary agriculture. The objective of this research was to determine the relationship between the humidity of the vegetation and the soil in different phenological stages, through remote sensing in a rice agroecosystem of Mayarí, Holguín. The ArcGis 3.10 software was used for the determination of the spectral indices and the radiometric correction of the multispectral images obtained from the Landsat 8 OLI / TIRS satellite of the zone 011/046 WGS84 / UTM 18 N of the municipality of Mayarí known as "Los Chinos. For the analysis, a completely randomized sampling grid was made with points every 50 meters of distance, from which the values taken in each pixel were extracted and processed in the STARGRAPHIC 5.0 software by means of simple linear regression analysis. The results obtained showed a high correlation and determination with values close to 1.00 of the relationship LSWI-NDVI, LSWI-EVI and LSWI-SAVI where the maps illustrated a high heterogeneity of said indices in the space and time in which the analysis was carried out. sows until grain harvest in the study area. It is concluded that there is a high relationship between the humidity present in the crop and the indices that establish the state of the vegetation and the soil, through the application of remote sensing techniques in rice-growing areas of the municipality of Mayarí.

Índice

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1. Generalidades del cultivo del arroz.....	4
1.1. Clasificación taxonómica del cultivo del arroz.....	4
1.2 Origen del arroz	5
1.3 Ecofisiología del cultivo del arroz	6
1.4 Fitotecnia del cultivo del arroz	7
1.5 Importancia del agua en el cultivo del arroz	8
1.6 Factores que afectan el rendimiento del arroz.....	8
1.2. Efecto del contenido de humedad del suelo en la siembra o plantación del arroz	9
2. Fundamentos de Teledetección	11
2.1 Teledetección o percepción remota.....	11
2.2 El espectro electromagnético.....	11
2.3 Radiación electromagnética.....	13
2.4 Cálculo de reflectividades.....	13
2.5 Imágenes satelitales.....	14
2. Fundamentos de teledetección para el estudio de la vegetación.....	14
2.3. Técnicas de captura de datos para medir la humedad del suelo y los cultivos.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
CONCLUSIONES.....	30
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1

INTRODUCCIÓN

El fórum mundial dedicado a la utilización del agua para producción de alimentos y al desarrollo rural (Hofwegen y Svendsen, 2000), mostró que para el año 2025 la población mundial aumentaría por 2 billones de habitantes para un total de aproximadamente 8 billones de personas. El requisito de agua crítico para el sustento de la producción inclusiva de comida será de $1700 \text{ m}^3 \text{ cápita}^{-1}$. Esta agua no está disponible para todo el mundo; casi la tercera parte de la población del mundo vivirá en regiones que experimentarán severa escasez.

Las actuales exigencias a las que está sometida la agricultura hacen necesario un compromiso entre producción y sostenibilidad. Ello exige, entre otros, un uso eficiente de los factores de producción y una gestión adecuada de los mismos (Casterad y Martínez, 2010).

La gestión de la información es hoy en día la herramienta más valiosa para afrontar los problemas ambientales, las autoridades regionales y nacionales administradores de los recursos hídricos, necesitan obtener información del comportamiento volumétrico de los recursos hídricos, esto para tener la certeza de tomar la mejor decisión en cuanto distribución, concesión de los recursos sin que afecte al medio ecológico y social.

La estimación directa del estado hídrico del suelo y la vegetación a partir de medidas de campo presenta una notable dificultad operativa, ya que requiere un costoso muestreo espacial y resulta difícil generalizar las medidas a territorios amplios. En este contexto, las imágenes de satélite pueden ser de gran utilidad para efectuar un seguimiento del contenido de humedad.

El principal interés de estos datos es proporcionar, con una buena frecuencia temporal y sobre grandes áreas, una exhaustiva información bien distribuida espacialmente del estado del agua; en estos momentos, el principal reto de los investigadores es demostrar que la información que proporcionan está relacionada con la humedad de la vegetación.

El desarrollo de sensores satelitales de gama alta, ha generado que los estudios sobre la tierra y sus recursos naturales se acrecienten, así como también disminuya el tiempo de levantamiento de datos de vastas áreas.

El precio de venta de imágenes satelitales de gran resolución y de software dedicado al Sistema de Información Geográfica (GIS), es la principal barrera para realizar estudios de monitoreo a nivel Nacional en las entidades estatales. Sin embargo hoy en día se cuenta con imágenes de media resolución espacial, disponibles por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), también los entornos de programación han evolucionado, haciéndose más gráficos y sencillos al trabajar con imágenes.

Además, la estimación directa del estado hídrico de la vegetación y del suelo a partir de medidas de campo presenta una notable dificultad operativa, ya que requiere un costoso muestreo espacial y resulta difícil generalizar las medidas a territorios amplios.

Diversos autores han intentado demostrar esta potencialidad, pero debido a que algunos posibles factores de ruido son difíciles de controlar se han realizado un amplio rango de medidas espectrales de laboratorio. Estos estudios han mostrado que el contenido hídrico de la vegetación está más claramente relacionado con la reflectividad en el infrarrojo medio, que se encuentra entre 1,4 y 2,0 μm (Cohen, 1991).

Es bien conocido que estas longitudes de onda presentan picos de alta absorción de agua y por consiguiente la reflectividad en el infrarrojo medio está negativamente relacionada con el contenido hídrico de las plantas.

El arroz constituye uno de los cereales de alta producción y consumo a escala mundial. Comúnmente se produce bajo riego por inundación, sin embargo, existen áreas de producción de arroz de secano, ya sea de secano no favorecido (sin aplicación de agua de riego) o arroz de secano favorecido (aplicación de agua para subsistencia).

En el municipio Mayarí de la provincia de Holguín se desarrolla un amplio proyecto de desarrollo de la producción arrocera para el cual se dispone del abasto de agua

del trasvase Este-Oeste. Para el manejo y uso eficiente del agua que se suministra en estas áreas, se desconoce el estado hídrico de la vegetación, durante el establecimiento y cosecha del cultivo, factores que inciden en el rendimiento y en las actividades de cosecha (Yadav y Reyes 2017).

Por lo antes expuesto se plantea como **problema científico** el siguiente:

¿Cómo estimar mediante teledetección, el estado hídrico del suelo y del cultivo del arroz en su fenología, en áreas del agroecosistema Mayarí, de la provincia Holguín?

Ante esta pregunta científica se formula como **hipótesis** la siguiente:

“La estimación del estado hídrico del suelo y del cultivo del arroz en su fenología, en el agroecosistema Mayarí; mediante teledetección permite un mejor manejo y uso del agua ante las condiciones edafoclimáticas del área”.

Para dar cumplimiento a la pregunta científica, se define como **objetivo general**:

“Estimar mediante teledetección, el estado hídrico del suelo y del cultivo del arroz en su fenología, en un área del agroecosistema Mayarí, de la provincia Holguín”

Objetivos específicos:

- Determinar los índices correspondientes al estado de humedad del suelo y del cultivo, así como su variabilidad espacio temporal en las condiciones edafoclimáticas del agroecosistema Mayarí
- Recomendar el uso de información espectral de los índices utilizados, para un mejor uso y manejo más eficiente del agua en el agroecosistema Mayarí.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Generalidades del cultivo del arroz

1.1. Clasificación taxonómica del cultivo del arroz

El arroz pertenece a la siguiente clasificación taxonómica según Barzola (2012):

Reino: *Plantae*

División: *Anthophyta*

Clase: *Monocotyledoneae*

Orden: *Cyperales*

Familia: *Poaceae*

Género: *Oryza*

Especie: *Oryza sativa*

Nombre Científico: *Oryza sativa L.*

Es una planta autógama, que posee dos tipos de raíces: las seminales (temporales) y las adventicias (permanentes). El tallo es redondo y hueco, compuesto por nudos y entrenudos en un número variable. Los cinco entrenudos superiores se prolongan de manera creciente a fin de llevar la inflorescencia sobre la planta.

En cada nudo del tallo se desarrolla una hoja, en la que se distinguen la vaina, el cuello y la lámina; en el cuello se encuentra la lígula y las aurículas que fijan la hoja al tallo a manera de protección. La lámina es de tipo lineal, larga y más o menos angosta según las variedades, el haz tiene venas paralelas con nervadura principal prominente. La presencia de vello en las hojas y de pigmentación antociánica en los márgenes, o en toda la lámina son caracteres varietales (CIAT, 2010).

La vida de las hojas es corta y para la época de floración solamente hay 4 a 5 hojas verdes en cada tallo y de ellas las dos hojas superiores son responsables de la fotosíntesis de un 75 % de los carbohidratos que van al grano.

La inflorescencia es una panícula situada sobre el nudo apical, el fruto del arroz es una cariósida donde el ovario maduro seco e indehisciente, consta de la cáscara formada por la lemma y la palea que protegen al embrión, situado en el lado ventral cerca de la lemma y el endospermo que provee alimento al embrión durante la germinación (INIAP, 2007).

1.2 Origen del arroz

El lugar geográfico de origen y domesticación del arroz no está todavía definitivamente establecido. Diversos historiadores y científicos concuerdan en que el origen del arroz es el sudeste de Asia. La India, una de las regiones de mayor diversidad es donde existen numerosas variedades endémicas. Las provincias de Bengala y Assam, así como Mianmar, han sido indicadas como centros de origen de esa especie (Embrapa, 2004). El consenso general es que la domesticación del arroz ocurrió independientemente en China, India e Indonesia, otorgándole por consiguiente tres líneas de arroz: Sínica (también conocido como japónica), índica y javánica (también conocido como bulu en Indonesia).

El género *Oryza* es el más rico e importante de la tribu *Oryzaceae* y engloba cerca de 23 especies. Fue rápidamente dispersado de sus hábitats tropicales (del sur y sudeste de Asia) y subtropicales (del sudoeste y sur de China) a altitudes y latitudes superiores en Asia, llegando a Japón hace unos 2300 años (Chang, 1983).

La especie *Oryza sativa* es considerada polifilética, resultante del cruzamiento de formas espontáneas variadas. El arroz fue introducido en lugares tan lejanos como el oeste de África, América del Norte y Australia en los últimos seis siglos. Hasta su introducción por los árabes en el Delta del Nilo, el arroz no era conocido en los países Mediterráneos. El arroz fue cultivado en el siglo VIII en España y Portugal y en el sur de Italia entre el siglo IX y X (Lu y Chang, 1980). Fueron, probablemente, los portugueses quienes introdujeron este cereal en África Occidental, y los españoles, los responsables de su diseminación en América.

1.3 Ecofisiología del cultivo del arroz

El arroz se cultiva en una diversidad de condiciones ambientales que van desde los 45 grados de latitud norte a los 40 grados de latitud sur y desde el nivel del mar hasta 2500 metros de altitud. Se considera que es un cultivo especial para zonas húmedas de los trópicos o para climas de temperaturas altas. Estas condiciones permiten que en las áreas arroceras tanto la temperatura, longitud del día como también las condiciones de disponibilidad de agua sean muy diversas (Juliano, 1993).

Altas temperaturas, abundante radiación solar y disponibilidad de agua son requisitos fundamentales en la producción de arroz. Las variedades de arroz se comportan de manera diferente en los distintos ecosistemas de producción, esto es, en su interacción con el medio ambiente -clima, suelo, prácticas de cultivos y agentes biológicos que la afectan.

Los métodos de producción de arroz van desde los más primitivos a los altamente mecanizados (De Datta, 1988), y se destacan aquellos realizados en ecosistemas con riego y los de secano.

Los ecosistemas con riego tienen mayores rendimientos ya que el agua controlada en el riego reduce los factores limitantes del cultivo, siendo estos ecosistemas menos complejos, más estables y uniformes que los de secano. La inundación del suelo crea condiciones físicas, químicas y biológicas diferentes de aquellas existentes en suelos secos o drenados. Diversas fuentes (Reddy *et al.*, 2000) coinciden en señalar que estas condiciones influyen sobre los siguientes aspectos:

- Absorción de nutrientes por la planta de arroz
- Disponibilidad y pérdida de nutrientes
- Retardo en el intercambio gaseoso entre el suelo y el aire
- Reducción del suelo
- Cambios electroquímicos y químicos que acompañan a la reducción del suelo, tales como:
 - i. incremento del pH en suelos ácidos y disminución en los calcáreos
 - ii. pérdidas de nitrógeno por desnitrificación

- iii. acumulo de sustancias resultantes de la actividad de los microorganismos anaeróbicos
- iv. reducción del hierro y manganeso, aumentando así la cantidad aprovechable por el cultivo
- v. aumento en la disponibilidad de nutrientes tales como fósforo y silicio
- vi. acumulación de amonio
 - Fijación del nitrógeno del aire por bacterias, algas verde azules
 - Control de malezas
 - Eliminación del estrés por sequía
 - Facilidad en la nivelación del suelo
 - Reducción de la intensidad de plagas, enfermedades y desordenes fisiológicos

1.4 Fitotecnia del cultivo del arroz

La preparación del terreno puede realizarse en seco o mojado. En las áreas donde el arroz se cultiva por el método de siembra directa, la preparación del suelo se realiza en seco y de forma similar que para otros cultivos y las operaciones de labranza consisten en arar, rastrillar y nivelar para luego realizar la siembra. En áreas húmedas, mal drenadas y de difícil drenaje la preparación del suelo se realiza por el método denominado fanguero.

En este sistema, las operaciones de labranza se realizan bajo agua y el arroz es trasplantado o bien se realiza la siembra con semillas pregerminadas. En ambos casos el agua de irrigación es mantenida en el campo por medio de camellones o taipas. En cuanto a los ecosistemas de secano son más difíciles de manejar y son aquellos en que el cultivo de arroz depende de las lluvias para su normal crecimiento, y además carecen de la sistematización para la retención de una lámina de agua sobre su superficie.

La ausencia de una lámina de agua produce interacciones entre las variedades y la nutrición mineral (deficiencias en elementos menores y desbalances en los macroelementos), las sequías, las plagas y enfermedades, dando como resultado un complejo de factores limitantes diferentes a los ecosistemas irrigados.

1.5 Importancia del agua en el cultivo del arroz

Uno de los insumos más importante para cualquier cultivo y en especial el arroz, sin lugar a dudas es el agua (PNUD, 2016). En el último decenio se han evidenciado disminuciones drásticas de los volúmenes de agua en los embalses, debido a las prolongadas y frecuentes sequías influenciadas por el cambio climático, afectando de esta manera a la producción de los cultivos y en especial al arroz, el cual demanda un volumen importante del preciado líquido.

En un futuro no muy lejano, de continuar los bajos volúmenes de precipitaciones, habrá que recurrir al uso adecuado y cuidadoso del agua de mar, como alternativa para mitigar los escasos de agua para la producción de arroz.

Una manera importante de incrementar de manera sostenible la producción de arroz en el país y un ahorro del recurso agua, es haciendo uso del cultivo de arroz de rebrote, o también conocido como soca o retoño, con el que se alcanzan rendimientos aceptables y es una actividad viablemente económica.

1.6 Factores que afectan el rendimiento del arroz

Son muchos los factores que afectan el rendimiento del arroz y su calidad industrial, destacándose, el momento en que se cosecha y el manejo del riego previo a la misma, produciéndose disminución en los porcentajes de granos enteros, la cantidad de panículas por metro cuadrado y en el propio rendimiento agrícola (de Ávila *et al.*, 2015).

Por otra parte, en la evaluación de las condiciones agrometeorológicas para la producción arrocería en Cuba, Delgado (2012) considera que la acción combinada de las variables climáticas siguientes: temperatura, humedad relativa del aire, fuerza del viento, brillo solar y precipitaciones tienen un efecto determinante en el cultivo del arroz en condiciones de producción.

Al respecto, Rivero-Vega *et al.* (2018) refieren que el descenso de la temperatura y el decrecimiento de la radiación solar conducen al incremento de los rendimientos potenciales del arroz.

1.2. Efecto del contenido de humedad del suelo en la siembra o plantación del arroz

La humedad del suelo es una variable clave en muchas investigaciones agrícolas, hidrológicas y meteorológicas (Hernández y Medina, 2012). En la agricultura con un conocimiento previo de las condiciones de humedad del suelo se puede establecer la frecuencia de riego, obtener una adecuada producción de cultivos y un buen tratamiento químico (Hanson *et al.*, 1999).

En otros aspectos investigativos la humedad está vinculada con el control de intercambio de agua y energía entre la superficie del suelo y la atmósfera mediante la evaporación y la transpiración (Jackson *et al.*, 1996).

La producción arroceras es quizás una de las actividades agrícolas más agresivas al medio por los manejos que requiere. Al respecto, se ha demostrado por investigaciones y la propia práctica productiva, que si no se cuidan los suelos dedicados a este cultivo, en el transcurso de unos pocos años pierden sus propiedades agroproductivas y las cosechas no resultan rentables (Gálvez *et al.*, 2002).

En el proceso productivo de esta planta, el riego ejerce una gran influencia respecto a otros factores de manejo del cultivo como son: fertilización, aplicación de agroquímicos y control de arvenses (Monasterio *et al.*, 2012).

Uno de los manejos en cuestión consiste en utilizar una lámina de agua superficial, que se establece antes o después de la siembra y perdura en el campo hasta momentos cercanos a la cosecha, lo que presupone el uso de diferentes prácticas agrícolas durante la preparación y el manejo poscosecha del suelo, las que inciden sobre las propiedades del medio edáfico (Díaz *et al.*, 2009).

Páez *et al.*, (1995) concluyeron que al aumentar el espesor de la lámina de agua disminuye el rendimiento y que en suelo saturado los parámetros de producción se incrementan.

Mishra y Salokhe (2010) observaron, una mayor densidad de longitud de raíz y una mayor tasa de actividad de las raíces microbianas que afectaron los

parámetros de rendimiento que contribuyen en todos los ensayos, tanto realizados en condiciones de semi campo o campo.

Grillo (1985) indica que el arroz es el cultivo que demanda mayor cantidad de agua, de 10.000 a 30.000 m⁻³ ha⁻¹ ciclo, de acuerdo con la eficiencia de riego utilizada. Polón *et al.* (2004) indicaron que el manejo del riego desde aniego durante 48 horas hasta suelo a capacidad de campo, permiten, el mayor porcentaje desde un 96 hasta un 100 % de germinación, correspondiendo estos valores a los mayores rendimientos agrícolas.

Demey *et al.* (1994) señalan que después de varios años de aplicación, el mal manejo de la lámina de agua de riego está provocando severos daños sobre las condiciones físicas del suelo y otros aspectos relacionados con la explotación de este cultivo

1.3. Efecto de la humedad en el estado fisiológico del cultivo del arroz

La profundidad óptima del agua es difícil de definir con precisión. En gran parte depende del grado de control que se tenga del agua y del estado de nivelación del campo (Fernández, 1980).

Según Grist (1982), el manejo eficiente del agua conduce a lograr rendimientos más altos con menos agua. El control del agua resulta esencial si se quiere dar al cultivo en crecimiento las cantidades adecuadas de ella cuando las necesita. El drenaje periódico resulta importante si la provisión de agua es incierta o su control es imperfecto, ya que la imposibilidad de volver a inundar los campos pondría en peligro el cultivo. El rendimiento resulta muy afectado si la provisión de agua es insuficiente, en especial en la época de espigamiento.

Un periodo extenso de inundación profunda indudablemente afecta al desarrollo de la planta: reduce el macollamiento y el número de panículas y, por lo tanto, baja el rendimiento. Donde se espera que el cultivo vaya a quedar expuesto a aguas profundas, las plántulas se deben colocar más juntas y aumentar su densidad (Grist 1982).

Es conocido que el sistema radical desempeña un papel importante en la absorción de agua y nutrientes (Yang *et al.*, 2004), por lo que el manejo del suelo y su impacto sobre las propiedades físicas resulta esencial para el crecimiento y la distribución de las raíces, lo que incide directamente en el rendimiento del producto agrícola.

2. Fundamentos de Teledetección

2.1 Teledetección o percepción remota

La teledetección o percepción remota comprenden la adquisición y medida de información de algunas propiedades de un fenómeno, objeto o material, por un dispositivo de registro que no está en contacto físico, íntimo con el elemento de interés. La técnica involucra el conocimiento de objetos a través de la medición de los campos de fuerza, radiación electromagnética, o energía acústica, empleando cámaras, láser, receptores de frecuencia de radio, sistemas de radar, sonares, dispositivos termales, sismógrafos, magnetómetros, gravímetros y otros instrumentos (Alzate, 2001).

La aplicación de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres que tienen un comportamiento reflejado variable, condicionado por su estado al momento de la adquisición de la imagen (Pérez y Muñoz, 2006).

2.2 El espectro electromagnético

La radiación electromagnética es un fenómeno de transporte de energía que porta información del sistema que la genera o la remite. La percepción remota hace uso de esta propiedad, utilizando la interacción de la radiación con el objeto de estudio y así poder analizar su comportamiento bajo diversas condiciones, generando información oportuna al modelado del medio ambiente (Hernández, 2015).

La radiación electromagnética se traslada a la velocidad de la luz directamente de la fuente al espacio libre o indirectamente por reflexión o dispersión al sensor. Los modos de energía electromagnética más habituales son la luz visible, las ondas de radio, el calor, los rayos X y ultravioleta. Para entender las propiedades de la

radiación electromagnética se han planteado dos modelos aparentemente opuestos: el de la teoría ondulatoria y el de la teoría del movimiento de partículas. No obstante, ambas conjeturas se pueden compaginar, debido a que se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo con ambos patrones (Hernández y Montaner, 2009).

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 μm). 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 μm), verde (V: 0,5 – 0,6 μm), y rojo (R: 0,6 – 0,7 μm), es la única porción del espectro que podemos asociar al concepto de color.

Infrarrojo: cubre la región entre 0.7 y 100 μm , 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 μm) 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 μm). 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 μm 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 μm , 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 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

Microondas (M, por encima de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa (Chuvieco, 2002)

2.3 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 Km/s) transportando cantidades discretas de energía. (Sigmur, 2006) 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 ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$) (Chuvieco, 2008).

2.4 Cálculo de reflectividades

La conversión de los ND almacenados en una imagen cruda a variables físicas es un paso previo que resulta de gran utilidad en múltiples fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y entre la teledetección espacial y otros métodos de detección de energía electromagnética. La obtención de esas variables requiere resolver satisfactoriamente la acción de varios factores. Algunos hacen referencia al mismo sensor (calibrado de las radiancias), para lo cual es imprescindible contar con información de la entidad que lo gestiona, otras a las condiciones de observación

(ángulos de iluminación y adquisición) y otras a elementos del ambiente (efecto atmosférico y topográfico, iluminación procedente de otras cubiertas) (Chuvieco, 2002).

2.5 Imágenes satelitales

Una imagen satelital es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial a través de la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste; producto que posteriormente se transmite a estaciones terrestres para su visualización, procesamiento y análisis. Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, dependiendo del tipo de sensor. Desde las primeras cámaras fotográficas montadas en satélites en la década de los 60 hasta los más sofisticados y sensibles sensores hiperespectrales.

Existe una amplia gama de tipos de imágenes satelitales que hoy se utilizan en las más diversas áreas, dependiendo de su resolución espacial, así como de la información espectral que poseen; desde el espionaje militar, el monitoreo del cambio climático, monitoreo de incendios e inundaciones, seguimiento de huracanes y tifones, evaluaciones multiespectrales de vegetación etc. (Bense, 2007).

La información de la radiación solar reflejada o emitida por la superficie terrestre es capturada por el sensor y registrada en formato digital. Las imágenes se componen de una matriz regular o rejilla de celdas o píxeles. El valor numérico de cada píxel se define en función de la radiancia recibida por el sensor para esa porción de superficie, el cual se denomina nivel digital (ND). Una imagen se forma por determinadas bandas según la energía recibida en longitudes de onda específicas del espectro electromagnético.

2. Fundamentos de teledetección para el estudio de la vegetación.

La radiación solar es la fuente primaria de la energía para numerosos procesos biológicos que tienen lugar en las plantas (Slatyer, 1967). Las propiedades ópticas de las hojas dependen del número de factores, como: las condiciones de la radiación, especie vegetal, espesor de las hojas, estructura de la superficie de la

hoja, clorofila, contenido de carotenoides de las hojas, contenido de materia seca por unidad de área y estructura interna (Ross, 1981).

El primer contacto de la radiación es con la superficie de las hojas, las cuales consisten de la cutícula y capas de epidermis. El valor de luz que es absorbida o transmitida entre las hojas depende de su longitud de onda y de la selectividad de absorción de los pigmentos de la hoja, que pueden ser características de la misma especie o estar causadas por enfermedades o deficiencias nutritivas (Meer *et al.*, 2002).

La región del espectro visible en la vegetación se caracteriza por baja reflectancia y transmitancia, dada la fuerte absorción por los pigmentos foliares. El espectro de reflectancia de la vegetación verde muestra picos de absorción de alrededor de 420nm (violeta), 490nm (azul) y 660nm (rojo). Estos son causados por una fuerte absorción de la clorofila (Meer *et al.*, 2002).

La firma espectral de una planta muestra las características del comportamiento de la radiación electromagnética con la estructura de la planta (Meer *et al.*, 2002). Esta característica se presenta por la baja reflectancia de la clorofila y la alta reflectancia alrededor de 800 nm (infrarrojo cercano), asociada con la estructura interna de la planta sana y el contenido de agua. (Chuvienco, 2002).

2.1. Índices de vegetación

La percepción remota ha sido ampliamente utilizada para hacer seguimientos de la vegetación ya que presenta ventajas significativas frente a estudios de campo. Esto principalmente porque permite abarcar grandes extensiones de terreno, facilita el acceso a información de archivo (histórica) y permite la caracterización de vegetación en zonas de difícil acceso.

Sin embargo, la fenología en el ámbito de la teledetección es mucho menos detallada que la que se puede realizar en campo y no pretende hacer seguimiento a individuos ni especies en bosques naturales, menos en zona de tan alta biodiversidad como los Trópicos. En teledetección, la fenología se entiende como la dinámica de la vegetación debido al cambio en verdor.

Esta dinámica está asociada a cambios en las características físicas y químicas de las plantas, específicamente, en la estructura de las hojas y en los procesos fotosintéticos (Anaya y Valencia, 2013).

Existen diversos índices para representar el verdor, pero los más populares son el índice de vegetación normalizado (NDVI) y el índice de vegetación mejorado (EVI), los cuales se basan en la reflectividad de longitudes de onda pertenecientes a la parte óptica del espectro electromagnético.

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 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. Sin embargo, el uso de estos índices presenta algunos inconvenientes, dado que hasta la fecha ninguno de ellos ha conseguido eliminar completamente las influencias no deseadas (Gao *et al.*, 2000).

Además, su uso no permite estimar más de una variable al mismo tiempo, la cual ha de ser específicamente calibrada mediante una ecuación empírica cuyos forma matemática y coeficientes son particulares para cada estimación (Qi *et al.*, 2000).

2.2. Respuesta espectral del suelo

Las propiedades espectrales de los suelos difieren considerablemente de aquellas de la vegetación, dado que la mayoría de los sensores captan información sobre la

capa superficial de la tierra. Sólo donde el suelo está expuesto es posible captar información directa sobre éste como, por ejemplo, áreas áridas, semiáridas, o bien, en zonas recién preparadas para la siembra o erosionadas.

Donde exista cualquier tipo de cobertura, será ésta la que condicione la reflexión de energía electromagnética. Los factores que condicionan la reflexión de energía en los suelos son el contenido de humedad, textura, estructura y composición del suelo (Hernández y Montaner, 2009).

Según Basterra (2011), la firma espectral del suelo, cuando este se encuentra sin cobertura vegetal, muestra un comportamiento ascendente en su curva espectral, la cual va desde el espectro visible hasta el infrarrojo, estas variantes en el comportamiento del suelo se deben a la composición química, textura, estructura y el contenido de humedad presente en el mismo.

Los suelos con contenidos calizos tienden a tener una reflectividad alta en todas las bandas visibles, no siendo así en los suelos arcillosos, los cuales suelen tener una alta reflectividad en la banda roja del espectro, debido a la presencia de óxido hierro.

En general mayor reflectividad, cuanto más secos y menor contenido de materia orgánica posean. En las longitudes de onda largas, es determinante el contenido de humedad.

La textura juega un papel importante en el comportamiento espectral de los suelos, debido a su influencia en la capacidad de retención de humedad como a la influencia que ejercen el propio tamaño de las partículas sobre la reflectividad (Tipantuña, 2017).

En términos generales, el tamaño de las partículas influye en la proporción de radiación reflejada por los suelos en relación inversa a su tamaño. A mayor diámetro de las partículas menor proporción de reflectancia. En el caso de suelos arcillosos, aun en el caso de poca humedad, su reflectividad está influida por la curva de absorción del agua. En cambio, para los suelos arenosos su reflectividad es independiente de la curva de absorción del agua, siempre que la humedad del suelo no sea alta. En condiciones de laboratorio, las curvas de reflectancia para

diversas texturas presentan formas muy similares, tanto en la región visible como en el infrarrojo cercano y medio (Telesat, 1999).

La materia orgánica es una forma más directa que condiciona la reflexión en los suelos. Se ha demostrado que al destruir la materia orgánica en los suelos se produce un incremento en el nivel de radiación reflejada, situación que también se manifiesta en condiciones de campo.

Otro constituyente que influye directamente en las propiedades espectrales de los suelos son la presencia de óxidos de hierro, concentraciones notables de calcio, u otras sales que pueden acumularse en la superficie o afectar el desarrollo de la cobertura vegetal. Estos componentes influyen en las propiedades espectrales de los suelos, en tanto afecten el color en la superficie.

Así las concentraciones de calcio, producen suelos blanquecinos cuya reflectancia es mayor que la de los suelos rojos derivados de óxidos de Fe; los suelos negros ricos en materia orgánica, presentan los menores porcentajes de reflectancia (Telesat, 1999).

La obtención de una visión global de toda o una parte de la superficie de la Tierra a diferentes escalas, disponibilidad de una amplia variedad de sensores, posibilidad de obtención de información, tanto actualizada como histórica de una zona determinada; muestra datos no visibles para el ser humano, repetidamente en el tiempo y en algunos casos, de forma inmediata; integración de las diversas fuentes de datos (existentes, tomados en campo, por GPS, etc.) mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), a un costo relativamente bajo (Ruiz, 2008).

La información provista por sensores remotos es importante para estudios relacionados con el uso, la ocupación y la producción de la superficie del suelo. También permite la obtención de información de campo a un menor costo respecto a otros métodos, la cobertura de grandes áreas y la posibilidad de repetir la obtención de los datos en forma periódica a lo largo del tiempo (Bocco *et al.*, 2014).

Los productos de la teledetección han permitido, en la actualidad, anticipar y estimar el rendimiento de un cultivo agrícola con mayor precisión (Wang *et al.*, 2013). La teledetección desde plataformas remotas se ha utilizado para predecir el rendimiento del arroz y podría también utilizarse como una herramienta de ayuda a la decisión en el ajuste de la fertilización nitrogenada en cobertera (Moreno *et al.*, 2013).

Existen varios tipos de imágenes que se pueden utilizar para monitorear la superficie terrestre. En áreas agrícolas donde los lotes son pequeños, debido a su resolución espacial, los datos de LANDSAT TM y SPOT son muy adecuados; no obstante, la frecuencia temporal de estos satélites y la posibilidad de nubosidad durante sus pasadas son, a veces, una limitante (Bocco *et al.*, 2009).

2.3. Técnicas de captura de datos para medir la humedad del suelo y los cultivos

Existen diversas técnicas de captura de datos para evaluar la humedad, a partir de imágenes satelitales e imágenes de fotografía aérea, así mismo, existen varias metodologías de clasificación tales como: clasificación supervisada y no supervisada, análisis de componentes principales, clasificación híbrida, píxeles mixtos, clasificación por sub-píxel, índices espectrales y otros; cada método tiene ventajas y limitaciones que dependen de las características de los datos (Aponte y Ospina, 2019).

Cada uno de estos métodos tiene aparejados algunos inconvenientes, ya sea en cuanto a la exactitud y precisión de las estimaciones o en cuanto a la escala en espacio-tiempo de las mismas, elementos estos poco conciliables (Hernández y Medina, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del agroecosistema Mayarí

El municipio de Mayarí ubicado en la provincia de Holguín posee una superficie de 1304,2 km². El relieve fundamental es la altiplanicie de Nipe, donde se encuentra la meseta de Pinares de Mayarí, y en ella aparece la mayor altura del municipio, la Loma La Mensura con 995 m.

El territorio tiene varios lugares geográficos notables como son la bahía de Nipe, la mayor bahía de bolsa del país, con 21,7 km de largo, 14,2 de ancho y una profundidad máxima de 71,3 m en su canal de entrada. Entre los principales ríos se encuentran el Mayarí con 110 km de longitud, el Nipe, Guaro y Juan Vicente, entre otros.

Esta zona presenta una red fluvial desarrollada, con un alto por ciento del potencial hidráulico de la provincia y abundante lluvia (ONEI, 2019).

El clima del municipio de Mayarí es del tipo hiperárido y húmedo, presenta en los últimos 41 años valores medios de temperatura de 24,87 °C y de precipitación con 86,56 mm.

Según Corella *et al.* (2002), los Vertisoles de la provincia Holguín se caracterizan por ser sialíticos con relaciones moleculares SiO₂ / Al₂O₃ del orden de 4 y con predominio del Mg sobre el Ca, tanto en la masa de suelo como en la fracción arcillosa. Los suelos están saturados en bases y el pH tiende a ser generalmente neutro ó alcalino. Entre los cationes cambiabiles, en ocasiones, el magnesio iguala o supera al calcio, sobre todo en los horizontes inferiores de los suelos que toleraron con mayor intensidad el proceso de gleyzación.

Durante el proceso de formación, la materia orgánica se acumula (aunque en cantidades no muy altas), pero penetra por las grietas generalmente a bastante profundidad. Esta materia orgánica se une muy estrechamente con la arcilla (complejo arcillo-húmico), dando una tonalidad entre gris oscura y negra a todo el

perfil en los casos más representativos de este fenómeno, aunque en ocasiones puede ser pardo oscuro. La relación H/F es mayor que 2, y puede llegar hasta 4 en el horizonte con propiedades vérticas más desarrolladas, el porcentaje de huminas es de 35-40% y la relación C/N es de 13-20 (Corella *et al.*, 2002).

Área de estudio y análisis de datos

La investigación se realizó en el área de producción arrocera conocida como Los Chinos, ubicada en el agroecosistema Mayarí en la provincia de Holguín. Se utilizó un diseño de muestreo completamente aleatorizado con la elaboración de una grilla de 50 metros de espaciado entre puntos proyectados en el 011/046 sistema WGS84 /UTM zona 18 N (Figura 1).

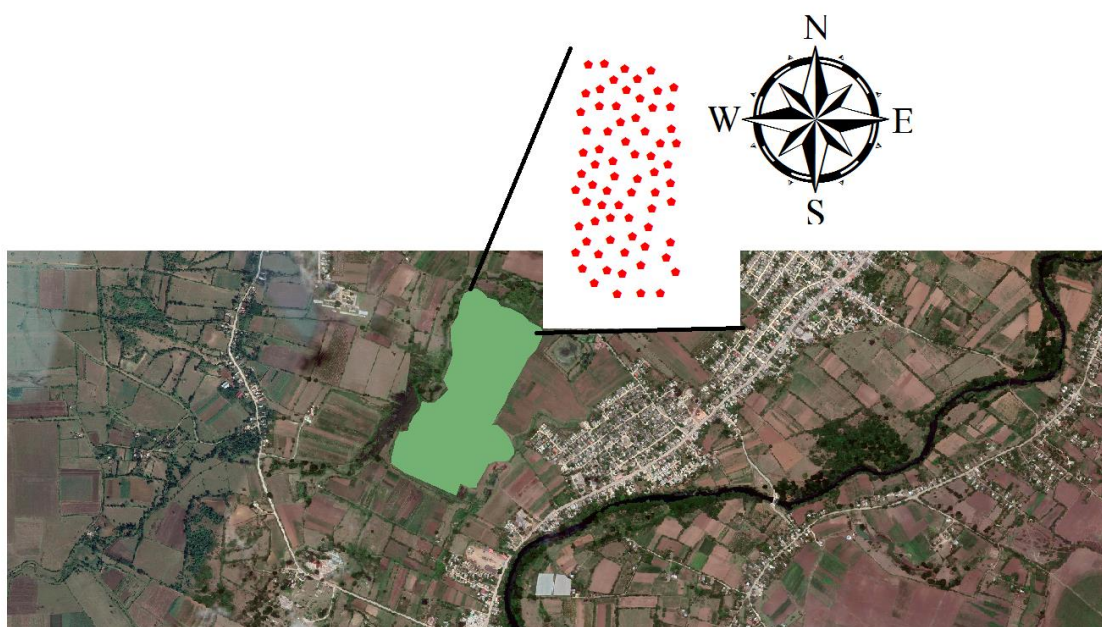


Figura 1. Imagen del SAS Planet del municipio de Mayarí, del área de producción arrocera “Los Chinos” y la grilla de muestreo utilizada para la extracción de los valores de los píxeles.

Para la obtención de las imágenes satelitales se utilizó el satélite Landsat 8 OLI/TIRS del Servicio Geológico de los Estados Unidos el cual tiene las siguientes características (Tabla 1).

Tabla 1. Características del sensor Landsat 8 OLI/TIRS según (USGS, 2020).

Bandas	Color de la banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (metros)
1	aerosol costero	0.433 - 0.453	30
2	Azul	0.450 – 0.515	30
3	verde	0.525 – 0.600	30
4	Rojo	0.630 – 0.680	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.845 – 0.885	30
6	infrarrojo de onda corta(swir1)	1.560 – 1.660	30
7	infrarrojo de onda corta(swir2)	2.100 – 2.300	30
8	Pancromático	0.500 – 0.680	15
9	cirrus	1.360 – 1.390	30
10	infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.30 – 11.30	100
11	infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 – 12.50	100

Las imágenes satelitales (Tabla 2) corresponden al período donde se estableció el cultivo del arroz variedad Prosequiza 4 sembrada a voleo sobre un suelo Vertisol Crómico (Hernández *et al.*, 2015), el 10 de enero de 2020 y cosechado el 30 de mayo del mismo año.

Tabla 2. Imágenes espectrales del satélite Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas en el estudio.

Imagen	Fecha
LC08_L1TP_011046_20200107_20200114_01_T1	Enero 7, 2020
LC08_L1TP_011046_20200123_20200128_01_T1	Enero 23, 2020
LC08_L1TP_011046_20200224_20200313_01_T1	Febrero 24, 2020
LC08_L1TP_011046_20200412_20200422_01_T1	Abril 12, 2020
LC08_L1TP_011046_20200530_20200608_01_T1	Mayo 30, 2020

A cada imagen se le realizó la corrección radiométrica para la eliminación de los factores atmosféricos que pueden influir en el cálculo de los índices espectrales, utilizándose el software ArcGis 10.5.

Para el mapeo y determinación del estado hídrico de la vegetación en diferentes estados fenológicos del cultivo del arroz (PPPM/ *Phenology and pixel-based paddy rice mapping*), se utilizó la metodología basada en el algoritmo planteado por (Dong *et al.*, 2016).

Se utilizaron para el reconocimiento de la humedad presente en la vegetación, la relación presente entre los índices espectrales determinados por teledetección; LSWI vs NDVI y LSWI vs EVI para poder discriminar las zonas críticas de humedad en la vegetación (Boschetti *et al.*, 2014) para lo cual se usó como criterio LSWI > EVI y LSWI > NDVI y LSWI >SAVI.

Para la determinación de los índices espectrales se utilizaron las siguientes expresiones:

Tabla 3. Índices espectrales de humedad de la vegetación determinados.

Índice espectral	Expresión	Referencia
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$\frac{g \times (B5 - B4)}{(B5 + C1 \times B4 - C2 \times B2 + L)}$	Huete <i>et al.</i> (2002)
LSWI (Normalized Difference Water Vegetation and Moisture Index)	$\frac{(B5 - B6)}{(B5 + B6)}$	Mohammadi <i>et al.</i> (2017)
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)}$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$\frac{[(B5 - B4) \times (1 + L)]}{(B5 + B4 + L)}$	Huete (1988)

Donde g, C1, C2, L, γ; equivalen a 2,5; 6; -7,5; 1; 0,9, respectivamente son parámetros de corrección de aerosoles del suelo.

Los valores de cada píxel fueron extraídos y procesados en una base de datos en el software STARGRAPHIC 5.0 donde se les realizó análisis de regresión lineal a cada etapa de crecimiento y desarrollo evaluada en el área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestran los modelos de regresión lineal obtenidos mediante análisis de regresión lineal en diferentes etapas fenológicas del cultivo del arroz en el área de estudio.

Se observa que en la mayoría de los casos se presentan modelos con una alta dependencia lineal entre el índice espectral relacionado con el estado de humedad de la vegetación (LSWI) con respecto al estado de estrés de la vegetación (NDVI) y a las características espectrales del suelo (SAVI) donde se estableció el cultivo.

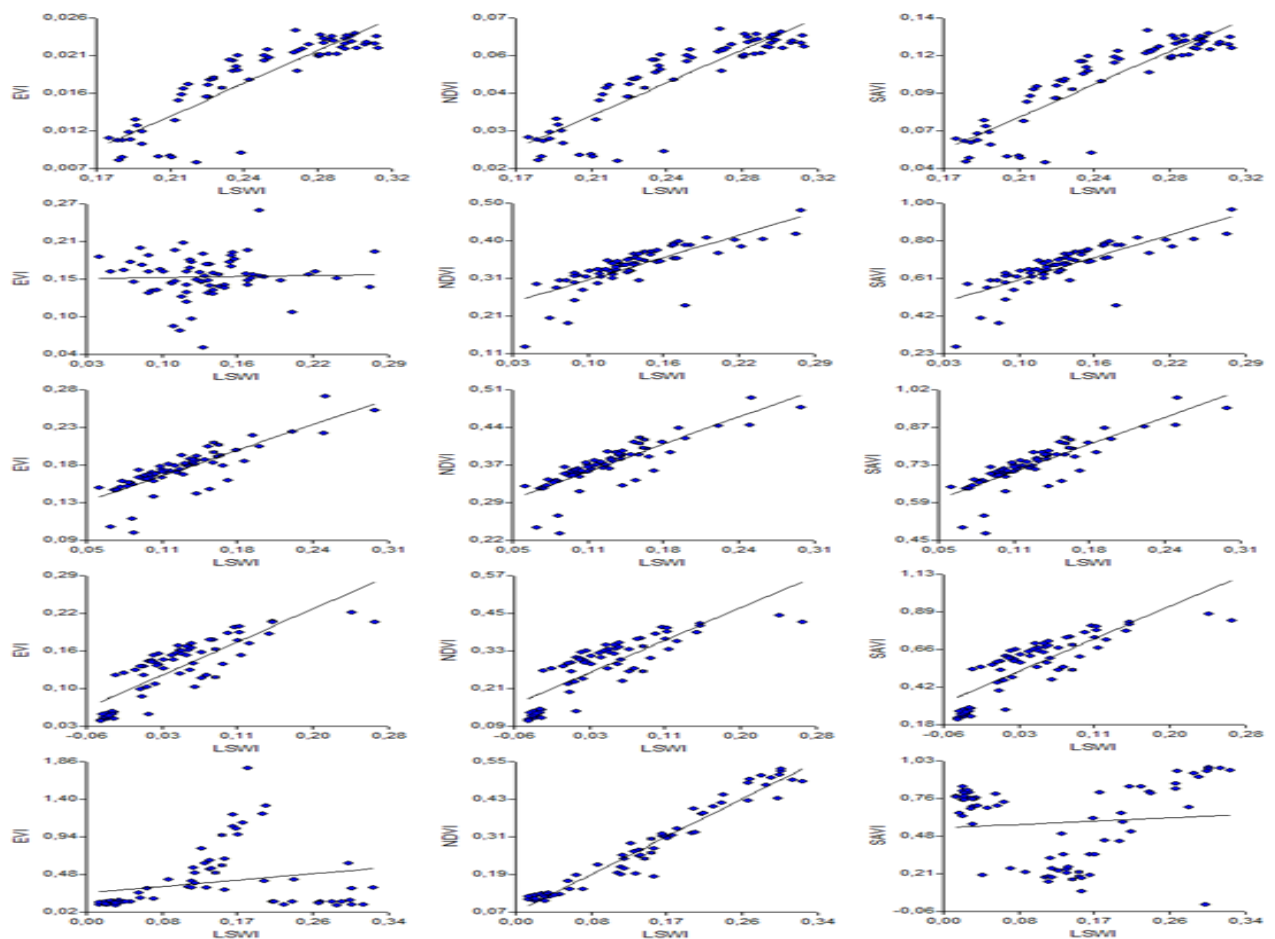


Figura 2. Modelos de regresión lineal obtenidos de los índices espectrales de humedad, de suelo y vegetación, en las diferentes etapas fenológicas del cultivo del arroz en el área de estudio.

La Tabla 4 ilustra los estadígrafos del análisis de regresión lineal realizado a los índices espectrales determinados en diferentes etapas fenológicas del cultivo del arroz en el área de estudio. De acuerdo con la información estadística se observa que en la determinación del estado de humedad del cultivo con respecto al estado de la vegetación muestra una alta determinación con valores que oscilan entre 61,9999 % hasta 95,8058; y correlación cercana al 100%.

El coeficiente de Durbin Watson indica la alta dependencia lineal entre las variables dependiente e independiente, con valores superiores a 1,00; y de error cuadrático medio dentro del rango permisible con respecto a los intervalos en que se expresan los índices espectrales calculados.

Tabla 4. Estadígrafos del análisis de regresión lineal obtenidos de la relación entre el índice espectral de humedad y los vegetación y suelo en diferentes etapas fenológicas del cultivo.

Fecha	R ²	r (%)	E.E	MAE	Durbin Watson	Ecuación del modelo
Enero 7, 2020	0,8852	78,358	0,0024	0,00176	1,6877	EVI = -0,0092 + 0,1104*LSWI
	0,8884	78,9339	0,0063	0,0047	1,6734	NDVI = -0,0229 + 0,2947*LSWI
	0,8884	78,9336	0,0126	0,0093	1,6734	SAVI = -0,0457 + 0,5894*LSWI
Febrero 23, 2020	0,7762	58,0445	0,1823	0,0828	1,0228	EVI = 0,1487+ 0,1886*LSWI
	0,7874	62,0006	0,03316	0,0224	1,9723	NDVI = 0,2133 + 0,9165*LSWI
	0,7874	61,9999	0,0663	0,0449	1,9721	SAVI = 0,4265+ 1,833*LSWI
Abril 12, 2020	0,8313	69,1066	0,0283	0,0252	1,2401	EVI = 0,0989 + 0,6588*LSWI
	0,8267	68,3558	0,0523	0,04567	1,2696	NDVI = 0,2239 + 1,1985*LSWI
	0,8267	68,3555	0,1046	0,0913	1,2695	SAVI = 0,4475 + 2,3969*LSWI
Mayo 30, 2020	0,2382	56,772	0,3565	0,2617	1,5666	EVI = 0,2596 + 0,9053*LSWI
	0,9788	95,8058	0,0279	0,0210	1,5452	NDVI = 0,0769 + 1,3828*LSWI
	0,0950	90,4227	0,2819	0,2512	1,0125	SAVI = 0,5458 + 0,2787*LSWI

**R²: Coeficiente de correlación de Pearson, r: coeficiente de determinación,
E.E: error estándar, MAE: error cuadrático medio.**

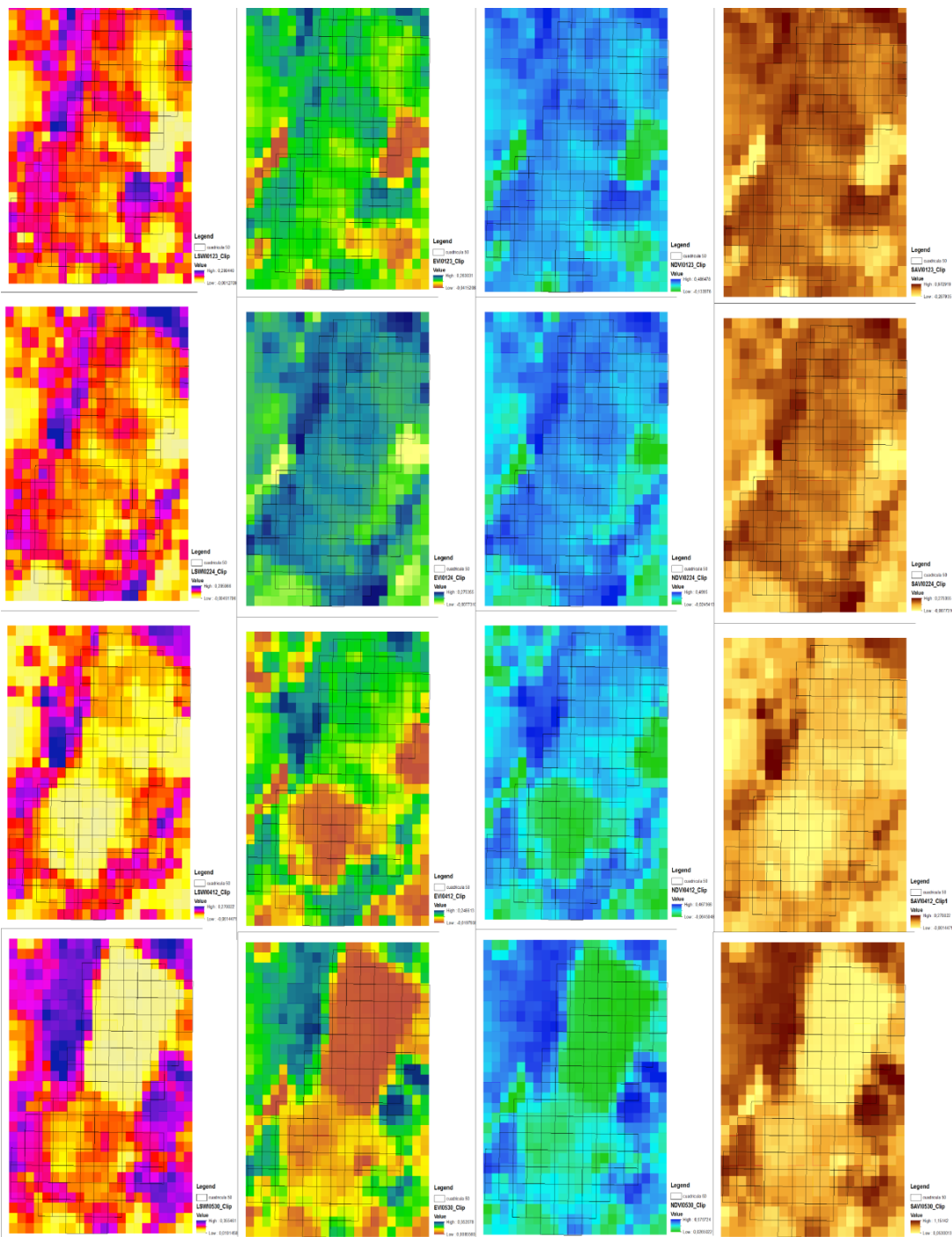


Figura 3. Variación espacio temporal de los índices espectrales determinados en diferentes etapas fenológicas del cultivo del arroz en el área de estudio.

La figura 3 ilustra la variación espacio temporal de los índices espectrales determinados en diferentes etapas fenológicas del cultivo del arroz en el área de estudio.

Se observa que existen cambios acentuados de los colores, los cuales indican los mínimos y máximos valores de los índices en las diferentes etapas del cultivo; los que de forma general presentan una alta heterogeneidad en el espacio y en el tiempo tanto del estado de humedad del cultivo, la presencia de vegetación y la saturación del suelo por el manejo del cultivo.

Según Jackson *et al.* (2004), en la agricultura es muy importante conocer la información del estado de humedad del suelo y la vegetación, dado que influye en la toma de decisiones con respecto al riego, el rendimiento del cultivo y el estrés causado por las condiciones de sequía.

Dong *et al.* (2016) mapeó áreas plantadas de arroz en el noroeste de Asia con imágenes del Landsat 8 y Google *Earth Engine*, en diferentes etapas fenológicas del cultivo, donde concluyó que es muy efectivo el uso de estas imágenes para estudios relacionados con la influencia del manejo antrópico, control de enfermedades, fertilización y evaluación de los efectos ambientales en agroecosistemas dedicados a este cereal.

Diversos autores han explorado el potencial del uso de la reflectancia captada por teledetección para la estimación del estado de humedad. Ceccato *et al.* (2002) refiere que cuando se usa el NDVI incide el contenido de clorofila presente en la planta con respecto al estado de humedad y su relación es proporcional, a medida que decrece el contenido de clorofila ocurre lo mismo con el contenido de agua en los cloroplastos de la planta.

Adicionalmente el uso del NDVI para estimar el estado de estrés por la humedad presente en la planta es saturado por los valores que toma el índice de área foliar, por lo que también el estado de humedad depende de la estructura del dosel de la planta (Jackson *et al.*, 2004).

En la investigación realizada por Qin *et al.* (2015) utilizó imágenes Landsat 8 OLI/TIRS para la identificación de cuerpos de agua en la llanura Sanjiang en China, donde reportó que en las zonas donde predominan los cuerpos de agua tiene un punto más bajo los valores de NDVI (menores a 0,10) y EVI, mientras que son superiores los de LSWI.

Una característica física única de los arrozales es que las plantas de arroz se cultivan en suelos inundados (Xiao *et al.*, 2009). Desde la perspectiva del desarrollo del dosel, los arrozales se pueden describir en términos de la fase de inundación (desde la fecha de la inundación inicial a la fecha del trasplante de arroz, solo se ve agua), fase inundada de dosel abierto (desde la fecha del trasplante de arroz hasta la fecha del cierre del dosel de arroz, una mezcla de agua y arroz plantas), fase de dosel cerrado (solo el dosel de la planta de arroz visto el agua está debajo del dosel y no se puede ver con los sensores sobre el dosel), y fase de poscosecha (suelos desnudos y arroz residuo vegetal).

Durante el período inundado de dosel abierto, los arrozales, son una mezcla de agua y plantas de arroz verde, y los valores de LSWI son mayores que los valores NDVI o EVI. Después del trasplante de plántulas de arroz, NDVI y EVI de los arrozales aumentan y la LSWI disminuye gradualmente.

Aproximadamente 50 a 60 días después del trasplante, la mayor parte del arroz, están completamente cubiertos por el dosel de arroz y los valores de LSWI son más bajos que los de NDVI o EVI.

Es importante señalar que otros tipos de cobertura terrestre siempre tienen valores LSWI más bajos que EVI o NDVI durante todo el crecimiento de la planta. La característica espectral única durante la inundación / período de dosel abierto sirve como detección de señal espectral en el análisis de series de tiempo imágenes de satélite como MODIS y Landsat 8 (Xiao *et al.*, 2011, Zhou *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

- Los índices espectrales determinados indican una alta relación entre el estado de humedad de la vegetación con los de suelo, con valores cercanos a 1,00 en las diferentes etapas fenológicas del cultivo del arroz estudiadas en el agroecosistema de “Los Chinos”.
- Existe una alta heterogeneidad de los valores que toman los índices espectrales tanto en el espacio como en el tiempo en que se realizó la siembra y la cosecha del cultivo.
- El índice LSWI puede ser utilizado como indicador del estado de humedad del suelo en áreas arroceras del municipio Mayarí a partir de su alta correlación y determinación con propiedades espectrales del estado de la vegetación y del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alzate, B. (2001). *Imágenes Espaciales de la Superficie Terrestre. Procesamiento Digital, Análisis y Extracción de la Información Temática*. Bogotá, Colombia.
- Anaya, Jesús Y Valencia, Germán. (2013). Fenología de ambientes tropicales en el marco de la teledetección. *GeoFocus*, ISSN: 1578-5157; 13(2): 195-211.
- 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
- Barzola, J. (2012). *Producción de arroz bajo riego de la variedad F-50 mediante el uso de briquetas compuestas de NPK en el cantón Daule*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al Título de Ingeniero Agropecuario. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.
- 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>
- 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. (2013). 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.
- Boschetti, M.; Nutini, F.; Manfron, G.; Brivio.; P.A, Nelson, A. (2014). Comparative analysis of normalised difference spectral indices derived from MODIS for detecting surface water in flooded rice cropping systems. *PloS One.*; 9.
- Bouman, B.; Hengsdijk, H.; Hardy, B.; Bindraban, P.; Tuong, T y Ladha, J. (2002). *Water-wise rice production. Los Baños (Filipinas): Water-wise rice production: Foreword.* International Rice Research Institute.
- Burgan, R. E. (1995). Use of remote sensed data for fire danger estimation. *Int. Workshop on Remote Sensing and GIS applications to forest fire management.* (E. Chuvieco, Ed.) Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá: 87-97.
- Burgan, R. E. y R. A. Hartford (1993). *Monitoring Vegetation Greenness with Satellite Data.* Ogden, Utah, USDA Forest Service.
- Casterad, María y Martínez, Antonio. (2010). Aplicación de la teledetección a la mejora del manejo y gestión del agua de riego en Aragón. *Monográfico Teledetección*, 7-9.
- Ceccato, P.; Flasse, S y Gregoire, J. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. *Remote Sensing of Environment*, 82, 198-207.
- Chang, T.T. (1983). *The Origins and Early Cultures of the Cereal Grains and Food Legumes.* En: KEIGHTLEY, D.N. (Ed.) *The Origins of Chinese Civilization.* Berkeley, CA, USA, University of California Press. pp. 65-94.
- 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.

- CIAT. (2010). *El arroz y su medio ambiente*. Cali, Colombia, Producción Eco-Eficiente del Arroz en América Latina, pp. 83-97
- Cocero, David.; Riaño, David y Chuvieco, Emilio. (2000). Estimación de la humedad de diferentes especies vegetales mediterráneas mediante distintos sensores de teledetección. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible, Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá*, pp 200-221.
- Cohen, W. B. (1991). Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing* 12: 1865-1876.
- Crist, E.P. (1985). A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 301-306. [doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6)
- De Avila, L.A.; Martini, L.F.; Mezzomo, R.F.; Refatti, J.P.; Campos, R.; Cezimbra, D.M.; Machado, S.L.O.; Massey, J.H.; Carlesso, R.; Marchesan. (2015). Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation. *Agronomy Journal*, 107(2): 442-448. DOI: 10.2134/agronj14.0080.
- De Datta, S.K.; Gomez, K.A. & De Scalsota, J.P. (1988). Changes in yield response to major nutrients and in soil fertilizer under intensive rice Cropping. *Soil Science*, 146(5): 350-358.
- Delgado, C. (2012). Influencia de las condiciones agrometeorológicas sobre la producción arrocería en Cuba.”, En: *III Congreso de Meteorología Tropical Tema: La Agrometeorología en los Trópicos*, pp. 518-551, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba.

- Demey J. R.; M. Adams y H. Fréites. (1994). Uso del método de análisis de componentes principales para la caracterización de fincas agropecuarias. *Agronomía Tropical* 44 (3): 475-497.
- Díaz, A.; Carbonell, J.; Vásquez.; G y Bejarano, L. (1989). Nivelación de lote para la producción de arroz de riego. Cali (Colombia): CIAT. 52 p.
- Díaz, G. S.; Cabrera, J. A y Ruiz, M. (2009). Modificaciones a las propiedades físicas del suelo por la acción de diferentes prácticas productivas para cultivar arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, 30(3): 40-46.
- Dong, Jinwei.; Xiao, Xiangming.; Menarguez, Michael A.; Zhang, Geli Qin, Yuanwei.; Thau, David.; Biradar, Chandrashekhar.; Moore, Berrien. (2016). Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sens Environ*, 185: 142-154.
- Dong, Jinwei.; Xiao, Xiangming.; Menarguez, Michael.; Zhang, Geli.; Qin, Yuanwei.; Thau, David.; Biradar, Chandrashekhar y Moore, Berrien. (2016). Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sens Environ*, 185: 142-154.
- Eidenshink, J. C., R. E. Burgan y R. H. Haas. (1990). Monitoring fire fuels condition by using time series composites of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. (P. Resource, Ed.) Washington DC: 68-82.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2004). Historia do Arroz. *Embrapa Unidade Arroz e Feijão*.
- Fernández, V. (1980). Observaciones de la técnica utilizada en la producción comercial de arroz anegado en la zona de Liberia, Guanacaste. Práctica de especialidad ITCR. San Carlos Costa Rica.
- Gálvez; V.; Navarro, N.; Otero, L.; Rivero, L; Bahamonde, A.; Hernández, O. y Pérez, J. M. (2002). La degradación de suelos. Estudio de un caso. Área

arrocera de Pinar del Río. En: Congreso Científico del INCA (13: 2002, nov 12-15, La Habana) Memorias. CD-ROM. La Habana: Instituto Nacional de Ciencias agrícolas. ISBN 959-7023-22-9.

Gao, J., Li, X., Brierley, G. (2012). Topographic influence on wetland distribution and change in Maduo County, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 9(3), 362-371. doi.org/10.1007/s11629-009-2263-0

Grillo, M. F. (1985). Diseño de sistema de riego y distribución de agua. Arroz: Investigación y producción. CIAT. Cali. Colombia. p. 387-399.

Grist, D. H. (1982). Arroz. Primera edición. Editorial Continental. México, D. F. 80p.

Hanson, J.D., K.W. Rojas & M. J. Schaffer. (1999). Calibrating the root zone water quality model. *Agronomy Journal*, 91: 171–177.

Hernández, A.; Pérez, Juan Miguel.; Bosch, Dalmacio y Castro, Nelson. (2015). Clasificación de los suelos de Cuba 2015. Cuba.

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, Pereira y Medina, Y. (2011). Evaluación de técnicas de asimilación de datos para estimar la humedad del suelo”, Reporte de Investigación del Instituto de Cibernética, Matemática y Física, No 635, ISSN 0138-8916, La Habana, Cuba.

Hernández, Yunay y Medina, Hanoi. (2012). Estimación de la humedad del suelo mediante técnicas de asimilación de datos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, 21(4): 30-35.

- Hofwegen, van, P. and M. Svendsen. (2000). A vision of water for food and rural development, World Water Forum, 17 March 2000, The Hague, The Netherlands
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X y Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ*, 83 (1-2), 195-213.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ*, 25(3): 295-309.
- INIAP. (2007). Origen y Distribución del Arroz. Quevedo, Ecuador: Estación Experimental Tropical Pichilingue, Manual del Cultivo de Arroz (66).
- Irons, J.R., Dwyer, J.L., & Barsi, J.A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*, 122, 11–21.
- Jackson, T.J., T.J. Schmugge y E.T. Engman. (1996). Remote sensing applications to hydrology: soil moisture. *Hydrology Journal*, 41(4): 517-530.
- Jackson, Thomas.; Chen, Daoyi; Cosh, Michael; Li, Fuqin; Anderson, Martha.; Walthall, Charles.; Doriaswamy, Paul y Ray, E. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment* 92: 475-482. DOI:10.1016/j.rse.2003.10.021.
- Juliano, B.O. (1993). Rice in Human Nutrition. Preparado en Colaboración FAO Biochemistry Unit. Plant Breeding, Genetics and Biochemistry Division and International Rice Research Institute. Published with the Collaboration of the International Rice Research Institute - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.

- Kauth, R.J. Thomas, G. (1976). The tasselled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In LARS Symposia, page 159.
- Lu, J.J. y Chang, T.T. (1980). Rice in its Temporal and Spatial Perspective. En LUH, B.S. (Ed.) *Rice. Production and Utilization*. AVI Publishing Co. Westport. CT. USA. pp. 1-74.
- Massey, R.E., Myers, D.B., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A. (2008). Profitability maps as an input for site-specific management decision making. *Agron. J.* 100:52–59.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDVI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. doi.org/10.1080/01431169608948714
- Mishra, A. and V. M. Salokhe. (2010). Flooding stress: The effects of planting pattern and water regime on root morphology, physiology and grain yield of rice. *Journal of Agronomy and Crop Science* 196: 368-378.
- Mohammadi, A., Costelloe, J.F., Ryu, D. (2017). Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of largescale arid zone floodplains. *Remote Sensing of Environment*, 190, 70-82. doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.003
- Mohammadi, A., Costelloe, J.F., Ryu, D. (2017). Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of largescale arid zone floodplains. *Remote Sensing of Environment*, 190, 70-82. DOI: doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.003.
- Monasterio, Pedro.; Lugo, Luis y López, Huáscar. (2012). Desarrollo y producción de arroz (*Oryza sativa* L.) con diferentes profundidades de láminas de agua

- en Calabozo, estado Guárico, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12 (1): 117-126.
- Páez, O. y C. Barrios. (1995). Efecto de la interacción siembra – lámina de agua sobre el crecimiento, desarrollo y producción de arroz en época de verano. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 12: 25-45.
- Pinty, B. y M. M. Verstraete (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* 101: 15-20.
- PNUD. (2016). Informe sobre Desarrollo Humano, Inst. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Colombia.
- Polón, R.; R. I. Castro, A. Miranda, M. Ramírez y N. Pérez. (2004). Diferentes manejos de agua en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) y su influencia en la germinación, masa seca, altura de la planta y el consumo de agua. *Cultivos Tropicales* 25 (2): 95-97.
- Qin, Yuanwei.; Xiao, Xiangming.; Dong, Jinwei.; Zhou, Yuting.; Zhu, Zhe.; Zhang, Geli.; Du, Guoming.; Jin, Cui.; Kou, Weili.; Wang, Jie y Li, Xiangping. (2015). Mapping paddy rice planting area in cold temperate climate región through analysis of time series Landsat 8 (OLI), Landsat 7 (ETM+) and MODIS imagery *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105: 220-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.04.008>.
- Reddy K.R.; D'Angelo, E.M. y Harris, W.G. (2000). Biogeochemistry of wetlands. En: SUMMER M. E. (Ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press New York. pp: G-89-118.
- Rivero-Vega, R.E.; Rivero-Jaspe, Z.I.; Rivero-Jaspe, R.R. (2018). Impactos de una fluctuación climática sobre el arroz, maíz y soya en Camagüey – Sancti Espíritus”, [en línea] *Revista Cubana de Meteorología*, ISSN-2664-0880, 24(1): 44-60.

- 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.
- 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 Geomática. pp:84.
- Sandholt, I. y H. S. Andersen (1993). Derivation of actual evapotranspiration in the Senegalese Sahel, using NOAA-AVHRR data during 1987 growing season. *Remote Sensing of Environment* 46: 164-172.
- Sandoval, J. (2007). Principios de Riego y Drenaje. Editorial Universitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- 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.
- Troch, P.A.; Paniconi, C. y Maclaughlin, D. (2003). Catchment-scales hydrological modeling and data assimilation". *Adv. Water Res.*, 26: 131-135.
- USGS (United States Geological Survey). (2020). Center for Earth Resources Observation and Science (EROS).
- Villar P. (2008). Análisis del mercado mundial de arroz. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). XVI Jornadas técnicas de arroz. Zaragoza, España.

- 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, 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
- Xiao, X.; Dorovskoy, P.; Biradar, C y Bridge, E. (2011). A library of georeferenced potos from the field. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 92: 453-454.
- Xiao, X.M.; Biradar, C.M.; Czarnecki, C.; Alabi, T.; Keller, M. (2009). A simple algorithm for large cale mapping of evergreen forests in tropical America, Africa and Asia. *Remote Sens.-Basel* 1: 355-374.
- Xiao., Boles, S., Froking, S., Salas, W., Moore III, B., Li, C., He, L., Zhao, R. (2002). Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in china using VEGETATION sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(15), 3009-3022. doi.org/10.1080/01431160110107734
- Yadav, S y Reyes, L. (2016). Why invest in optimizing water use in rice farming. *Rice Today*.
- Yang, C.; Yang, L.; Yang, Y. y Ouyyang, Z. (2004). Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils. *Agricultural Water Management*, 70: 67-81.
- Zhou, Yuting.; Xiao, Xiangming.; Qin, Yuanwei.; Dong, Jinwei.; Zhang, Geli.; Kou, Weili.; Jin, Cui.; Wang, Jie y Li, Xiangping. (2016). Mapping paddy rice planting area in rice-wetland coexistent áreas through analysis of Landsat 8 OLI and MODIS images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 46: 1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.11.001>.