

Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite

Characterization of the Spectral Signature from Remote Sensors for the Management of Plant Health in the Oil Palm Crop



AUTORES

Leonardo Araque Torres

Msc en Geomática. Ingeniero electrónico. Asistente de investigación. Cenipalma, Programa Agronomía, Sección Agricultura de Precisión. laraque@cenipalma.org

Andrés Jiménez

Msc. en Ciencias, área física. Ingeniero electrónico. Pasante en investigación. Cenipalma. Programa Agronomía, Sección Agricultura de Precisión. Grupo DSP. UPTC. andres.jimenez@uptc.edu.co

Palabras CLAVE

Sanidad vegetal, Sensores remotos, Firma espectral, Índices de vegetación, Palma de aceite.

Plant health, Remote sensing, Spectral signature, Vegetation index, Oil palm.

Recibido: 23 agosto de 2009
Aceptado: 4 septiembre de 2009

Resumen

Este trabajo presenta un avance en los resultados de las investigaciones que ha realizado Cenipalma con miras a establecer modelos predictivos del comportamiento espacio-temporal de fenómenos asociados al manejo de la sanidad vegetal, como el daño causado por defoliadores o la incidencia del Complejo Pudrición del Cogollo (PC), mediante el uso del procesamiento digital de imágenes adquiridas por sensores remotos satelitales. El estudio se realiza en plantaciones de la Zona Central palmera ubicadas en el área de Puerto Wilches. El algoritmo desarrollado relaciona la información adquirida del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) producto MOD09A1 (Reflectancia de la superficie terrestre), con la información de las series históricas del ataque por insectos defoliadores durante el año 2007, clasificando zonas que se diferencian por la frecuencia del ataque de insectos defoliadores. Para caracterizar los patrones de las curvas espectrales, se identifican los valores de las bandas espectrales asociados con la obtención de índices de vegetación, analizando sus series temporales, lo que permite identificar los eventos de defoliación e interpretar los resultados en términos de niveles de defoliación. El presente avance plantea una metodología para el seguimiento de la problemática de sanidad en una plantación de palma de aceite a escala regional. De esta manera, relacionar el estado fenológico del cultivo con la información en el espectro del infrarrojo cercano abre el camino para identificar las diferentes fases de desarrollo del cultivo; en este sentido, el trabajo de laboratorio proyecta los estudios en el infrarrojo mediano y lejano con mayor resolución multiespectral que complementará la firma a escala de cada palma de aceite.

Summary

This article deals with the progress of the results of the investigations that Cenipalma has carried out with the aim of establishing predictive behavioral spatial – temporal models of phenomena related to the management of vegetation sanitation such as the harm caused by defoliators or the presence of the Bud Rot complex (BR) through the digital processing of images obtained by remote satellite sensors. The study was carried out in the plantations of the Central Palm Zone located in the area of Puerto Wilches. The algorithm developed crosses the information obtained from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensors product MOD09A1 (Land Surface Reflectance) with the information from the recorded histories of the defoliator insect attack in 2007, classifying zones that differentiate in frequency of defoliator attacks. In order to characterize the patterns of the spectral curve the values of the spectral wavelengths associated with obtaining vegetation indices were identified and their temporal series were analyzed, which allows the identification of defoliation events and the interpretation of results in terms of defoliation levels. This current work proposes a methodology for the monitoring of this sanitary problem in an oil palm plantation on a regional level. Thus, crossing the phenological state of the crop with the information in the near infrared spectrum clears the way for identifying the different phases in the crop's development. In this way, the laboratory work projects the studies in the intermediate and far infrared spectrum with a greater multi-spectral resolution, which complements the signature at the scale of each oil palm.



Introducción

El uso de metodologías para el seguimiento de problemas sanitarios involucra diferentes actividades de medición en una plantación de palma de aceite. Algunos factores importantes en esta tarea son: el consumo de tiempo, intensidad de la labor y dificultad de acceso para recolectar muestras en el campo representativas para la detección de la enfermedad, que permitan su representación espacial y el desarrollo de un modelo de estimación robusto, dada la gran extensión de las plantaciones. Para esto, aproximarse a la definición de las condiciones que representan la presencia de la enfermedad permite complementar los reportes históricos de campo.

El seguimiento y la administración de la información generada por una metodología de muestreo se viene realizando independientemente por los criterios de cada plantación, basándose en los planteamientos de las experiencias de las diferentes regiones palmeras o, en algunos casos, en los definidos por el Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).

La diferencia de criterios entre regiones y plantaciones dificulta la generación de diagnósticos locales y nacionales. De manera que es necesario gestionar la

información generada por el sistema de muestreo, unificar criterios entre las plantaciones y definir parámetros estandarizados.

A su vez, el sistema debe permitir incluir variables asociadas al sistema de trampeo y la presencia de las enfermedades Pudrición del Cogollo, anillo rojo y marchitez letal, lo mismo que de insectos plaga defoliadores, todo lo cual debe poder complementarse con el dato geográfico sobre el cual se realiza la lectura en el campo.

En este sentido, un sistema que permita generar mapas espectrales sobre el seguimiento de los problemas sanitarios es una importante herramienta para identificar el estado de sanitario de una planta, generalmente caracterizando los valores bajos de reflectancia en el espectro electromagnético visible y valores muy altos en el infrarrojo cercano (Aunirundronkool, 2008).

Los sensores remotos, junto con la información recopilada en el campo, permiten generar modelos de predicción capaces de estimar la correlación del fenómeno en el campo con las condiciones de reflectancia de la palma de aceite. En este sentido es importante seleccionar las variables que indivi-



dualmente presenten alta correlación para que en su conjunto se minimice el error de estimación (Houborg *et al.*, 2007).

El factor económico es muy importante al seleccionar la información de sensores remotos. Las imágenes de alta resolución, como las obtenidas del sensor IKONOS, por lo general se orientan a trabajos en áreas reducidas y no al análisis regional, lo cual implica costos adicionales en almacenamiento por el volumen de datos, actualización de imágenes y tiempo de procesamiento. Las imágenes obtenidas por los sensores Landsat-TM o MODIS pueden emplearse para trabajos a escala regional, dado que presentan características más generales respecto a su resolución espacial (Hurtado C., 1999). Por tal motivo, se requiere de información y procesos adicionales para alcanzar un buen entendimiento de las relaciones e interacciones entre las variables muestreadas, los atributos del cultivo y las habilidades computacionales para el desarrollo de un modelo.

El estudio sobre la variación espaciotemporal de la reflectancia, la radiación solar en las bandas del visible, infrarrojo y los índices de vegetación constituyen enfoques importantes para dar una mirada desde lo geográfico a los problemas relacionados con la evaluación de riesgos de plagas y enfermedades, su incidencia, propagación y severidad, así como apoyo a las actividades de muestreo y seguimiento.

Otro aspecto importante es que a partir del análisis geográfico, mediante técnicas de análisis exploratorio de datos y estadística espacial de la información, se generan planes de acción regional que permitan un manejo más económico y ambientalmente sostenible, y favorezcan la toma de decisiones de los técnicos apoyados en modelos. El uso de estas tecnologías ofrece ventajas tanto en la investigación como en la implementación de técnicas de agricultura de precisión, como bien puede ser en seguimiento a las poblaciones de plagas e incidencia de enfermedades.

Marco teórico

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. Las interacciones entre la radiación solar y las plantas pueden ser divididas en tres categorías: efectos térmicos, efectos fotosintéticos y efectos fotomorfológicos de la radiación. Cerca del 70% de la radiación solar absorbida por las plantas es convertida en calor y usada para mantener su temperatura y para el proceso de transpiración (efectos térmicos) (Slatyer, 1967; Gates, 1965 y 1968).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) (casi el 28% de la energía absorbida por la planta) es usada en la fotosíntesis y para la conversión de compuestos orgánicos de alta energía. Las propiedades ópticas de las hojas en la región PAR 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 (pigmentos orgánicos que se encuentran en forma natural en las plantas), 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. Por ejemplo, los pigmentos de clorofila absorben la luz violeta-azul y roja por la fotosíntesis. La luz verde es reflejada para la fotosíntesis, razón por la cual muchas de las plantas aparecen verdes. 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. La Tabla 1 muestra los principales pigmentos encontrados en plantas grandes y su absorción máxima (Meer *et al.*, 2002).

La energía absorbida de la parte visible del espectro electromagnético es usada para sintetizar los componentes orgánicos que las plantas necesitan para mantenerse.

Tabla 1. Pigmentos de las plantas y su absorción máxima. (Meer et al, 2002).

Tipo de Pigmento	Característica de Absorción Máxima (nm)
Clorofila a	420(violeta),490(azul),660(rojo)
Clorofila b	435(violeta),464(azul)
β -Caroteno	425(violeta),450(azul),480(azul)
α -Caroteno	420(violeta),440(violeta),470(azul)
Xantofila	425(violeta),450(azul),475(azul)

Los mecanismos envueltos en la absorción de la radiación por pigmentos en la vegetación verde son las transiciones de electrones (Belward, 1991; Verdebout *et al.*, 1994). Los pigmentos como la clorofila y los carotenos absorben la luz de energía específica, causando transición de electrones entre la estructura molecular del pigmento. La energía resultante de estas transiciones es usada para las reacciones fotoquímicas de la planta. Dado que la luz viene en pequeños paquetes (fotones) solo la de cierta energía puede causar la transición de electrones; de ahí que los pigmentos de las plantas absorban luz fuertemente en algunas longitudes de onda y no en todas (Meer *et al.*, 2002).

Cuando la hoja está enferma, la clorofila se degrada más rápido que los carotenos (Sanger, 1971). Este efecto genera un incremento en la reflectancia de la longitud de onda roja, debido a la reducción de la absorción de la clorofila. Carotenos y Xantofilos ahora son los dominantes en las hojas, y las hojas aparecen amarillas debido a que los carotenos y xantofilos absorben luz azul y reflejan la luz verde y roja.

La combinación de las luces verde y roja da el color amarillo. Cuando las hojas mueren, los pigmentos de coloración café aparecen (tannins), y la reflectancia de la hoja y la transmitancia en el rango de longitudes de onda entre 400 nm a 750 nm decrecen (Boyer *et al.*, 1988).

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). En la Figura 1 se aprecia la firma espectral de una planta sana en comparación con la del suelo.

De igual forma se observa el cambio que existe en el final de la longitud de onda del rojo; por tal razón, esta región (*Red edge*, en inglés), descrito primero por

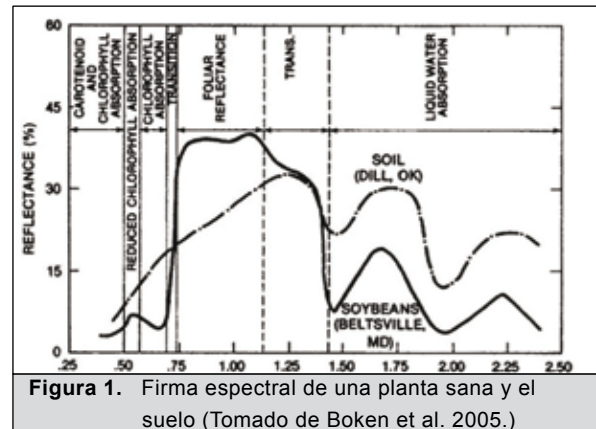


Figura 1. Firma espectral de una planta sana y el suelo (Tomado de Boken et al. 2005.)

Collins (1978), es una característica de la respuesta espectral de la vegetación y tal vez es la más estudiada en la curva espectral.

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. (Chuvieco, 2002).

Sensores remotos y procesamiento de imágenes

La percepción remota o teledetección es la colección de información de un objeto sin estar en contacto físico con él, mediante los denominados sensores remotos. La teledetección es la ciencia de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores y otros instrumentos instalados en plataformas espaciales, aviones, dirigibles y otros medios de adquisición de imágenes, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la tierra (reflectancia) (Zurita R., 2000).

En general, los sensores remotos pueden ser usados para estimar componentes biológicos mediante las técnicas de análisis de regresión, K-ésimo vecino más cercano y redes neuronales (Roy y Ravan, 1996; Nelson *et al.*, 2000^a; Steininger, 2000; Foody *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2004). Estos acercamientos se basan en la resolución espacial de los sensores remotos desde los puntos de vista fino, medio y grueso (Dengsheng Lu, 2006).

Los datos adquiridos en una resolución espacial fina (alta), como las fotografías aéreas o desde plataformas espaciales como IKONOS o Quick Bird, cuentan con



resoluciones espaciales de menos de 5m (0,25, 0,5 y 1m); son frecuentemente empleados para definir parámetros por árbol o las estructuras de la cobertura de los bosques (Levesque y King, 1999, 2003). Las técnicas empleadas para estas resoluciones incluyen algoritmos para: límites de segmentos multiescala, agrupamiento espacial basado en umbrales, sistemas expertos de visión o búsqueda de patrones de texturas.

Los datos de sensores remotos con una resolución espacial media (10 a 100m) se usan con frecuencia para análisis de series de tiempo (una fuente primaria para estimar factores biológicos en escalas locales y regionales) (Sader *et al.*, 1989; Roy y Ravan, 1996; Fazakas *et al.*, 1999; Nelson *et al.*, 2000^a; Steininger, 2000; Mickler *et al.*, 2002; Foody *et al.*, 2003; Phua y Saito, 2003; Calvao y Palmeirim, 2004; Zheng *et al.*, 2004; Lu, 2005). La mayoría de procedimientos para la estimación de los parámetros incluyen técnicas como: modelos de regresión lineal y no lineal, K-ésimo vecino más cercano y redes neuronales (Dengsheng Lu, 2006).

En estos factores de escala aún se presentan inconvenientes por la geometría de la cobertura vegetal, condiciones atmosféricas o topográficas que se han corregido en parte estimando índices de vegetación, especialmente sobre estructuras complejas (Lu *et al.*, 2004). En lugares donde la estructura de la vegetación es relativamente simple son más importantes las firmas espectrales para la estimación de parámetros en bosques (Lu, 2005; Lu y Batistella, 2005).

Los datos de sensores con resolución de más de 100 metros (resolución espacial baja) son empleados frecuentemente en escalas nacionales, continentales o globales. Como fuente primaria de información ofrecen una buena relación entre el área cubierta y la frecuencia de adquisición, lo que permite realizar estudios sobre la dinámica de la vegetación.

En esta escala se presenta mayor relación y sensibilidad a cambios entre el infrarrojo mediano y las propiedades de la vegetación que la reflectancia en el espectro visible e infrarrojo cercano (Boyd *et al.*, 1999). Las técnicas empleadas en estas escalas incluyen modelos de regresión lineales y múltiples, redes neuronales, k-ésimo vecino más cercano, modelos estadísticos generalizados, modelos basados en árbol o análisis de validación cruzada.

Sensores remotos en aplicaciones de detección de enfermedades

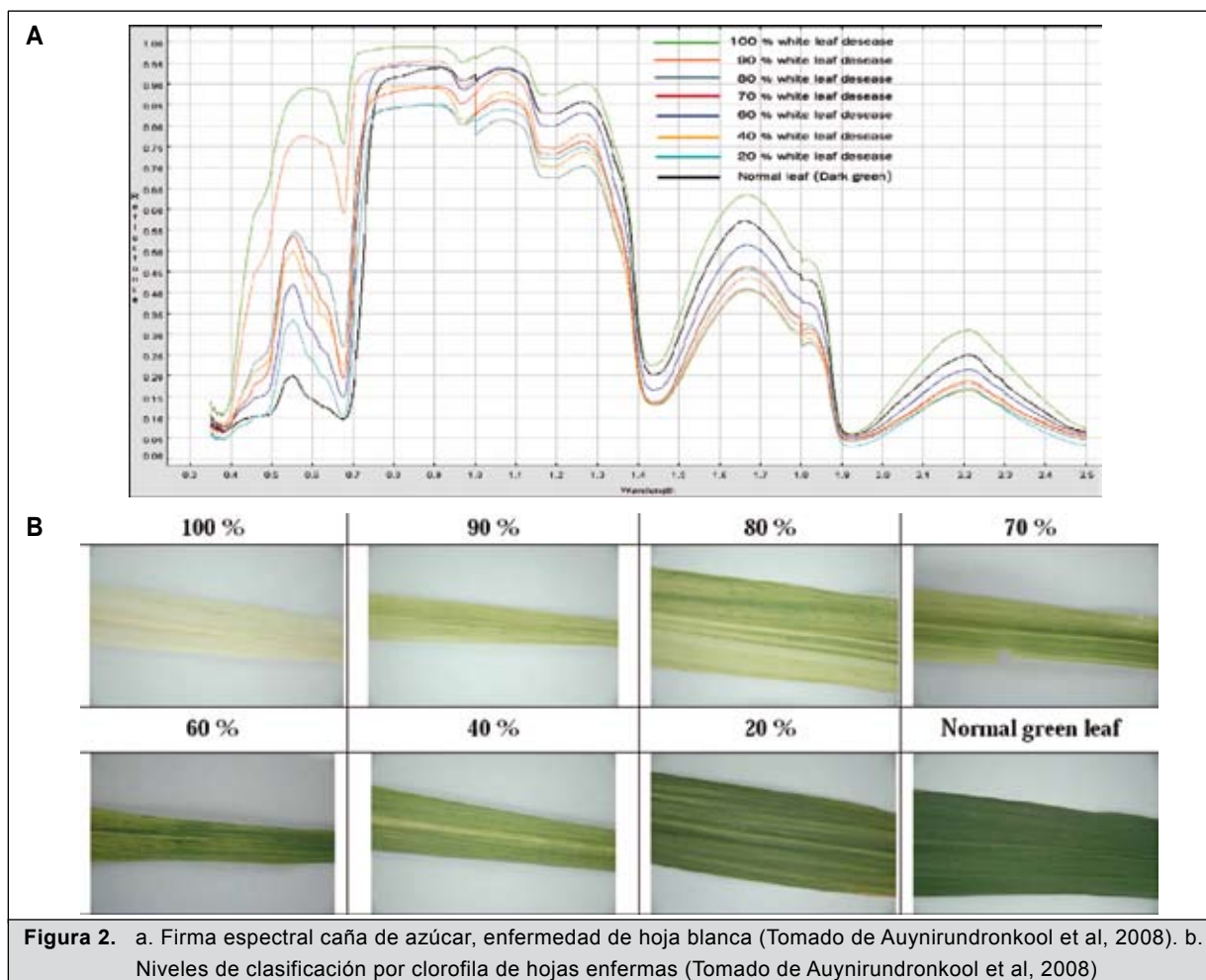
El crecimiento de los cultivos puede ser afectado por el estrés causado por la deficiencia de fertilizantes, y el ataque de plagas y enfermedades. La respuesta de la vegetación a este estrés puede ocasionar cambios bioquímicos a nivel celular y de hoja, que tiene influencia sobre los sistemas de pigmento y el contenido de humedad. Por otro lado, el estrés puede causar cambios biofísicos en la estructura de la cobertura, el índice de área foliar (IAF) o la biomasa (Meer *et al.*, 2002; Chuvieco, 2000, 2002).

Se han realizado estudios de las propiedades espectrales de las hojas de cebada atacadas por el mildew polvoso (*powdery mildew*), que es una enfermedad que ataca a un gran número de cultivos en los que el aumento de la reflectancia en el espectro visible fue observado después de la inoculación (Lorenzen *et al.*, 1989).

En otro estudio se empleó espectroradiometría para investigar la reflectancia de un campo de frijol infectado por *Botrytis fabae*; se observó un incremento de reflectancia en la región del visible y un decrecimiento en la región del infrarrojo cercano. Tales cambios fueron atribuidos al colapso en la estructura celular de la hoja con la enfermedad (Malthus *et al.*, 1993).

Una alternativa para hacer relaciones empíricas entre enfermedades y respuesta espectral de las plantas es el modelo de aproximaciones basadas en un grupo de ecuaciones o modelos de transferencia radiactiva. En esta aproximación el modelo de reflectancia de la vegetación puede ser usado para estimar las características biofísicas de los cultivos, pues provee suficiente información que puede ser obtenida mediante la combinación de datos de sensores remotos y datos de campo. Este procedimiento involucra el ajuste de parámetros de datos de campo con el modelo de reflectancia que mejor expresa el comportamiento de la enfermedad (Goel, 1989). Un ejemplo de esto es la definición de la firma espectral de la caña de azúcar para realizar un seguimiento económico del cultivo, por la enfermedad de hoja blanca (Figura 2a).

Los datos de entrenamiento empleados para caracterizar las curvas espectrales se definieron por la cantidad del contenido de clorofila, obteniendo las clases que se observan en la Figura 2b.



Las propiedades de la superficie de los cultivos hacen posible el seguimiento de la dinámica de la vegetación y su variabilidad espaciotemporal usando varias plataformas de sensores remotos. Los datos satelitales basados en la detección de la sanidad de la vegetación dependen de la relación fuerte entre simples transformaciones de reflectancia del rojo e infrarrojo y la absorción de la radiación fotosintéticamente activa (Apar) de la superficie de la vegetación (Meer *et al.*, 2002).

Varias de estas transformaciones referidas como índices de vegetación se basan en firmas espectrales únicas de la vegetación verde en las porciones de rojo e infrarrojo del espectro y forman la base para cuantificar el estado de la vegetación usando datos de sensores remotos. De acuerdo con Jackson *et al.* (1991), los índices de vegetación más comunes son: RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular VI)

y el TVI (Transformed Vegetation Index) y el TCAVI (Transformed Soil Adjusted VI).

Abdullah y Umer (2004) proponen que los daños de las enfermedades y las plagas se pueden medir por variaciones en el contenido de clorofila de las plantas, las cuales pueden ser analizadas por cambios en los patrones de las imágenes espectrales tomadas por los satélites. Estas técnicas usan imágenes multiespectrales para detectar las áreas bajo estrés. Los autores citan diferentes fuentes para las que este sistema fue útil en la evaluación de enfermedades (Brown y Steckler, 1995; Penuelas *et al.*, 1995; Lorenzen y Jensen, 1989; Sudbrink Jr. *et al.*, 2003; Harris *et al.*, 2001; Gat *et al.*, 1999; Yang y Cheng; 2001; Willers *et al.*, 1999), y el índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI, por su sigla en inglés) fue el parámetro que mejor correlación presentó en la evaluación del estado sanitario de los cultivos.



Sensores remotos en aplicaciones sobre el cultivo de palma de aceite

El empleo de imágenes satelitales en cultivos de palma de aceite ha sido usado principalmente en dos áreas: suelos y fisiología (Lukman y Poeloengan, 1992). Thenkabail *et al.* (2004) menciona el uso de datos de IKONOS para estimar el crecimiento de la biomasa en plantaciones de palma de aceite en África.

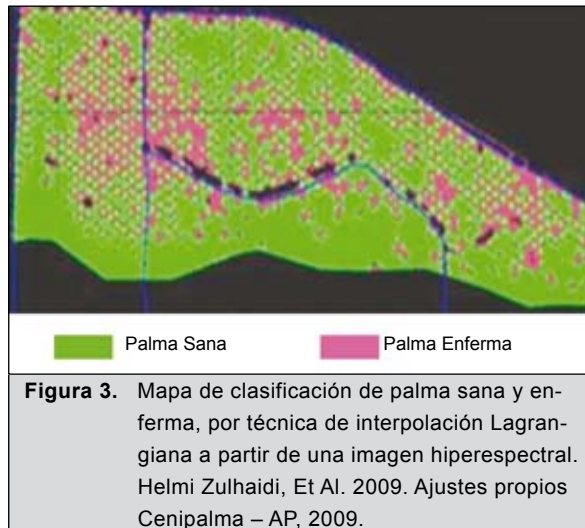
También se han realizado estudios en los que, con imágenes multiespectrales SPOT, es posible identificar condiciones particulares del follaje como hojas quebradas o ataques de *Ganoderma* (Kamaruzaman, 2001; Nordin, 1996; Lukman *et al.*, 1996). Más recientemente, Mohd (2009) plantea una metodología para el mapeo de infección de enfermedades en plantaciones de palma de aceite usando índices de vegetación y técnicas de Red edge.

También se han realizado estudios en los que se utilizan imágenes hiperespectrales, aerotransportadas para detectar *Ganoderma* en plantaciones de palma de aceite mediante las técnicas de interpolación lagrangiana, Red edge, índices de vegetación (NDVI, RDVI, SRI, MSR, SAVI, OSAVI) (Figura 3), que asocian el estrés de las plantas de palma de aceite con la absorción de clorofila en reflectancia (Helmi Zulhaidi *et al.*, 2009).

Materiales y métodos

Datos de sensores remotos

En el estudio desarrollado en este trabajo se emplea el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). La infraestructura consiste en un sistema de captación de datos el cual viaja a bordo de los satélites Terra (en órbita desde 1999) y Aqua (desde 2002), ambos con una frecuencia de paso diario (tanto diurna como nocturna), con una resolución espacial media (250-1000 m) y en 36 bandas espectrales entre el rango visible y el IR térmico. Los datos MODIS juegan un papel importante en el desarrollo de modelos terrestres y de predicción de cambios globales, muy útil para la toma de decisiones sobre la protección del medio ambiente. Su gran resolución espectral extiende su utilización a muy diversas aplicaciones, tanto relacionadas con usos del suelo, como con incendios forestales, inundaciones, clima, cubiertas



de nieve o hielo, datos de temperatura y vapor de agua, entre otros.

El satélite Terra presenta resoluciones espaciales de 250, 500 y 1.000 metros, y obtiene imágenes que favorecen el seguimiento de características del cultivo de palma de aceite (Barona *et al.*, 2004; Hyman *et al.*, 2006), debido a los diferentes productos que permite manipular, como son:

- MODIS/Terra. Surface Reflectance.
- MODIS/Terra. Vegetation Indexes.
- MODIS/Terra. Leaf Area Index/FPAR.
- MODIS/Terra. BRDF/Albedo.
- MODIS/Terra. Land Cover Type Yearly.
- MODIS/Terra. Temperature.

La información recopilada para el presente estudio, corresponde a los productos:

- MOD09A1: Reflectancia en las bandas del rojo, azul, verde y cuatro infrarrojos cercanos, con resolución espacial de 500m, resolución temporal de 8 días.
- MOD13Q1: Índices de Vegetación EVI (Enhanced Vegetation Index) y NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), con resolución espacial de 250 m, resolución temporal de 16 días.
- MOD15A2: LAI (índice de área foliar), FPAR (Radiación fotosintéticamente activa), con resolución espacial de 1.000 m, resolución temporal de 8 días.

- MOD11A2: Temperatura diurna y nocturna, con resolución espacial de 1.000 m, resolución temporal de 8 días.

Para obtener las imágenes de MODIS se emplea la especificación de grupo de datos globales de este proyecto, que corresponden a una cuadrícula de 17 filas x 35 columnas. Los datos para Colombia son definidos mediante las siglas: h10v08, que representan la columna 10 y fila 8, como lo indica la Figura 4.

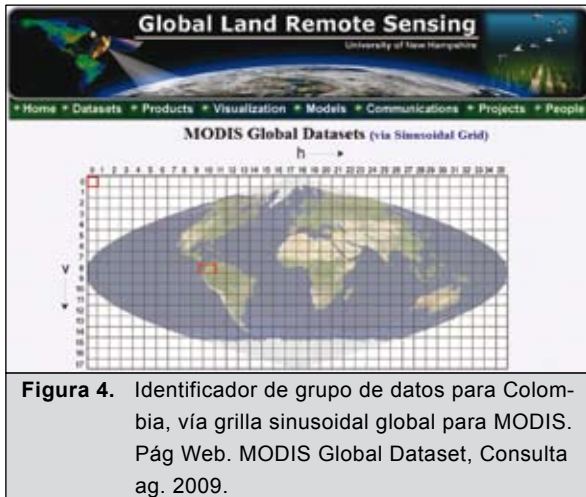


Figura 4. Identificador de grupo de datos para Colombia, vía grilla sinusoidal global para MODIS. Pág Web. MODIS Global Dataset, Consulta ag. 2009.

Para el análisis de las imágenes de sensores remotos se realizó un preprocesamiento del tipo correcciones geométricas. Por otro lado, se desarrolló un algoritmo en Python que permite recolectar la información de cada nivel digital de múltiples imágenes sobre el área de estudio, permitiendo manipular de manera automática los datos históricos con una baja carga de procesamiento.

Datos de campo

La información tomada de campo representa los registros históricos de los reportes quincenales del ataque en promedio de las poblaciones de insectos defoliadores durante el año 2007, base de datos con que se cuenta de mayor información regional histórica en la zona de Puerto Wilches.

En cuanto a información geográfica, los lotes codificados por plantación cuentan con características de fecha de siembra y material sembrado, como atributos para ser considerados respecto de su relación con la información de los sensores remotos.

Procesamiento digital de imágenes

A partir del preprocesamiento de los productos fuente de MODIS, se realiza una selección de las áreas geográficas representativas según la frecuencia que presenten de ataque de insectos defoliadores. De esta manera los datos de entrenamiento se ajustan a las características propias del fenómeno caso de estudio (Figura 5).

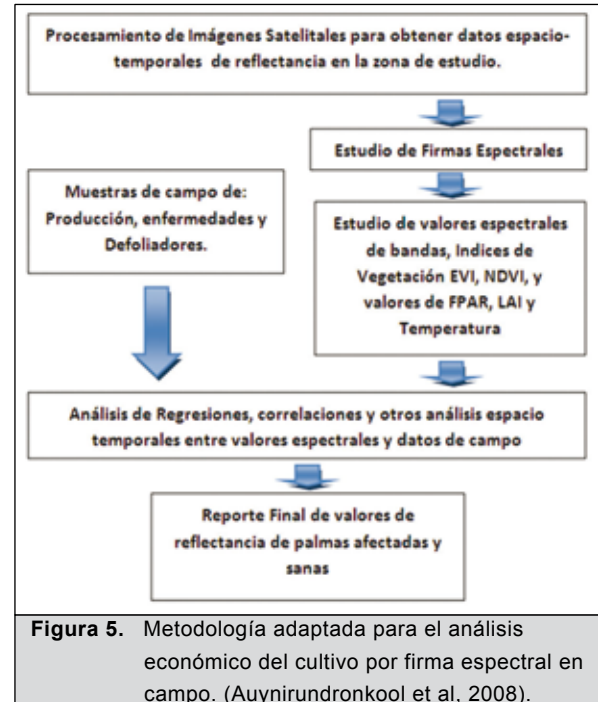


Figura 5. Metodología adaptada para el análisis económico del cultivo por firma espectral en campo. (Auynirundronkool et al, 2008).

El diagrama de bloques representa las actividades orientadas inicialmente a identificar regiones geográficas características del comportamiento de sanidad vegetal. Según su frecuencia, estas áreas geográficas se representan como de alta o baja incidencia de insectos defoliadores. Para esto se identifican lotes que registren para los cuatro trimestres del año presencia del promedio de poblaciones de insectos defoliadores sobre el umbral de manejo regional, esto es:

- Alta incidencia: sobre el umbral de manejo regional, durante cuatro trimestres.
- Baja incidencia: sobre el umbral de manejo regional, durante un trimestre.

Sobre el desarrollo de un software, soportado por el lenguaje de programación Python. Se carga la infor-



mación de imágenes de satélite y los datos de campo. Ello permite identificar las características de las firmas espectrales, las cuales requieren especial atención a las relaciones fuertes y simples entre la reflectancia del rojo y del infrarrojo, lo cual se obtiene al evaluar los valores de índices de vegetación.

Las firmas espectrales se clasifican, por otro lado, respecto a las variables fisiológicas del cultivo, como material de siembra y fecha de siembra, buscando cuantificar las variaciones de los valores de los niveles digitales; esto permite caracterizar sus patrones de forma.

Luego, el análisis de las series temporales que relaciona las variables de campo con los datos de sensores remotos abre la discusión sobre la correlación temporal entre las distintas variables, al plantear eventos que se identifiquen como patrones de comportamiento desde el punto de vista de pronósticos de eventos próximos. El estudio considera la necesidad de suavizar los datos, debido al ruido implícito de las condiciones atmosféricas que puede encontrarse el sensor remoto. La técnica empleada para suavizar la serie histórica es la propuesta por el filtro Savitsky Golay, (J. Chen *et al.*, 2004).

Resultados

Firmas espectrales

Para analizar las firmas espectrales se utilizan dos grupos de lotes según el comportamiento histórico del ataque por insectos defoliadores registrados

por trimestre, sobre el umbral de manejo regional (Tablas 2 y 3).

Para los lotes del grupo de alta incidencia se obtienen las siguientes firmas espectrales asociadas a su comportamiento en el tiempo:

Grupo alta incidencia por defoliación:

Lote AL1: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 6).

Lote AL2: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 7).

Lote AL3: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 8).

Lote AL4: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 9).

Grupo baja incidencia por defoliación:

Lote BL1: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 10).

Lote BL2: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 11).

Lote BL3: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 12).

Tabla 2. Grupo de lotes representativos de alta incidencia por defoliadores

Item	AL1	AL2	AL3	AL4
Material	IRHO	IRHO	CHEMARA	CHEMARA
Siembra	1976	1978	1979	1979
Latitud	7.2447591745	7.2378980166	7.2410969818	7.2438274020
Longitud	-73.87375221	-73.88208914	-73.88209676	-73.88218581

Tabla 3. Grupo de lotes representativos de baja incidencia por defoliadores.

Item	BL1	BL2	BL3	BL4
Material	1975	1975	1975	1975
Siembra	IRHO	IRHO	IRHO	IRHO
Latitud	7.2288743583	7.2319923100	7.2347953343	7.2366939483
Longitud	-73.84119083	-73.83853554	-73.83844345	-73.83798970

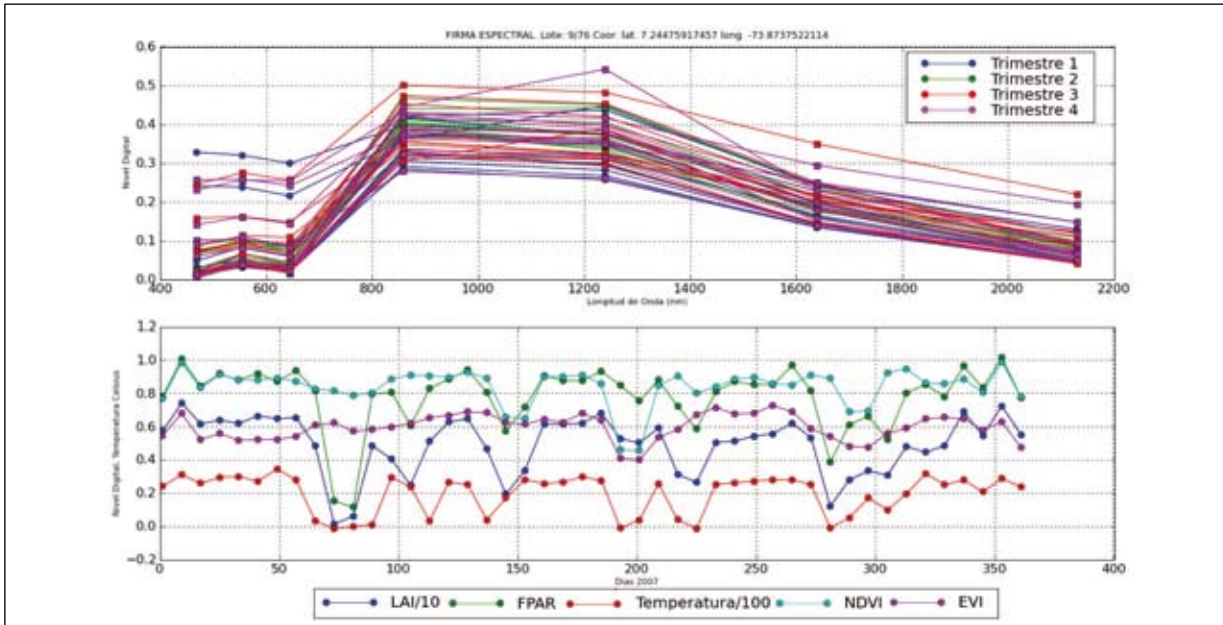


Figura 6. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote AL1.

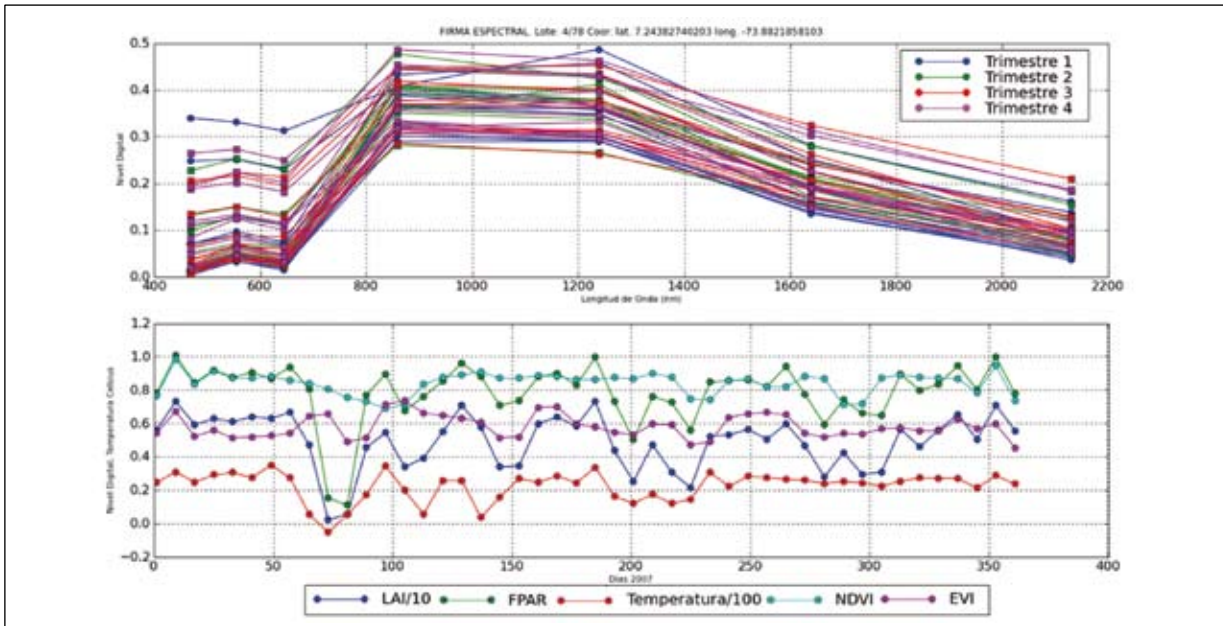


Figura 7. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote AL2.

Lote BL4: Procesamiento de la firma espectral y comportamiento temporal de las variables asociadas a los sensores remotos, año 2007 (Figura 13).

Las figuras obtenidas para el grupo de lotes de alta y baja incidencia (Figuras 6 a 13) permiten observar cómo los valores en el espectro electromagnético

del azul, verde y rojo presentan aumentos cuando la planta es atacada con mayor incidencia por los insectos defoliadores, evidenciando patrones similares como lo mencionado por Malthus *et al.*, 1993; Lorenzen *et al.*, 1989; Aynirundronkool *et al.*, 2008, respecto al comportamiento fenológico de la planta y su respuesta espectral.

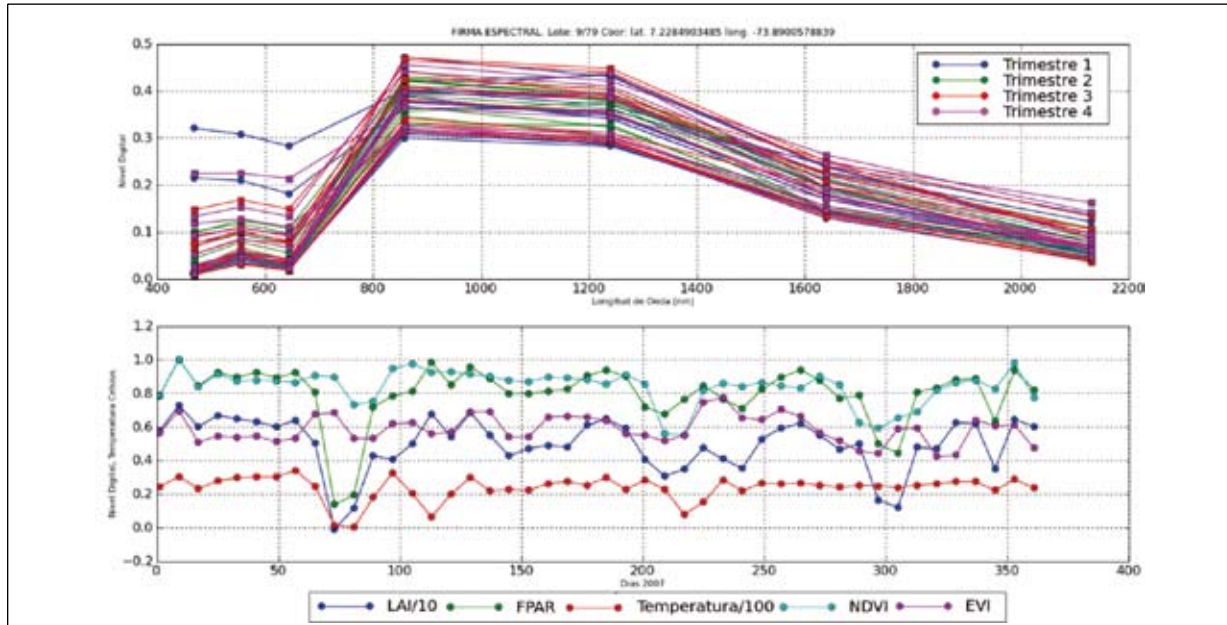


Figura 8. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote AL3.

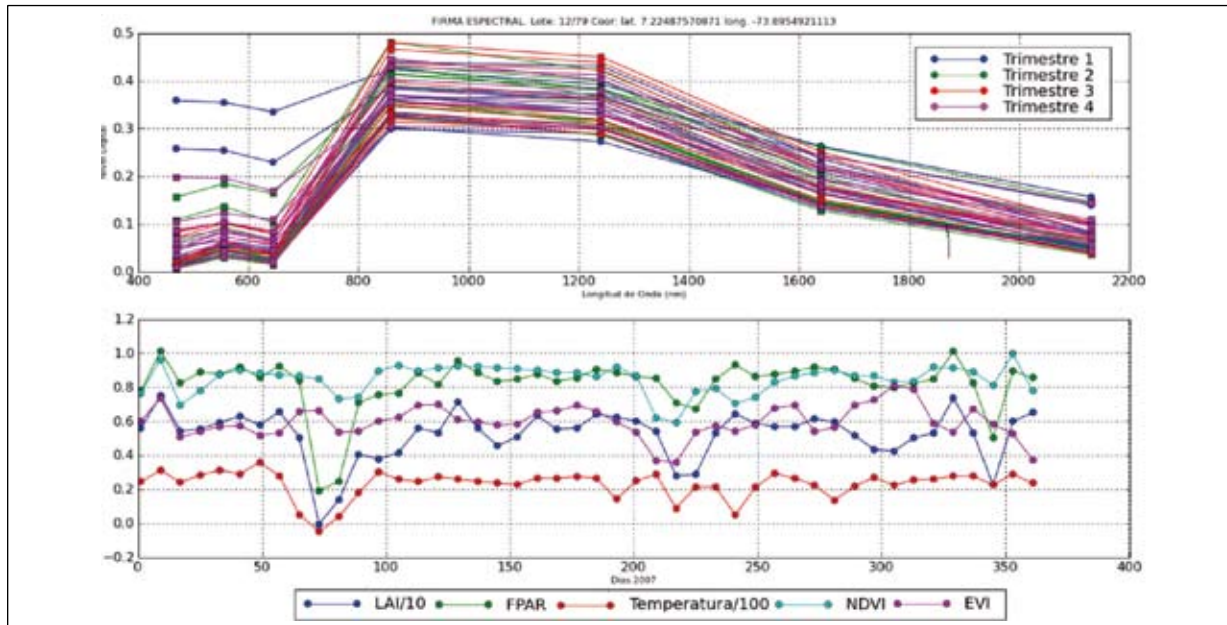


Figura 9. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote AL4.

Caracterizar patrones de las firmas espectrales del fenómeno de defoliación a escala regional respecto a los índices de vegetación se presenta como una aproximación al comportamiento de este, dado que para el caso se emplea la mejor resolución espacial que provee el sensor MODIS sobre el producto MOD13Q1

de 250mx250m por pixel. Estos valores digitales se ajustan en mayor medida al clasificar por criterios de variables fenológicas, como son el material de siembra y la fecha de siembra.

Las Figuras 14, 15, 16 y 17 presentan la firma espectral para diferentes poblaciones de estudio. La

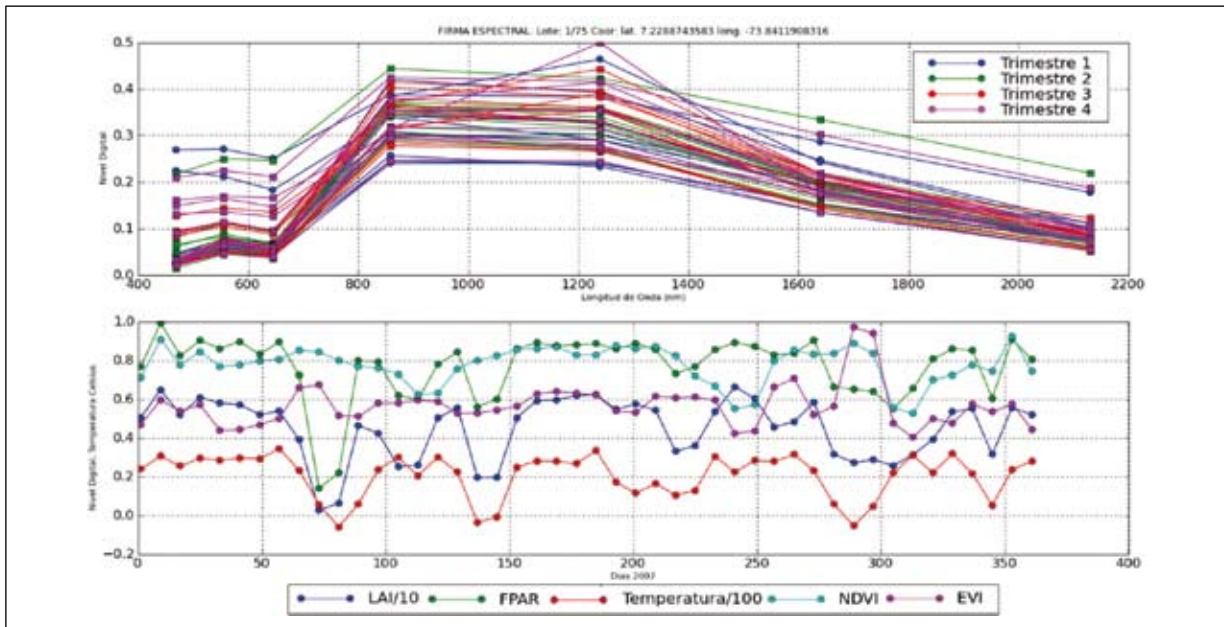


Figura 10. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote BL1.

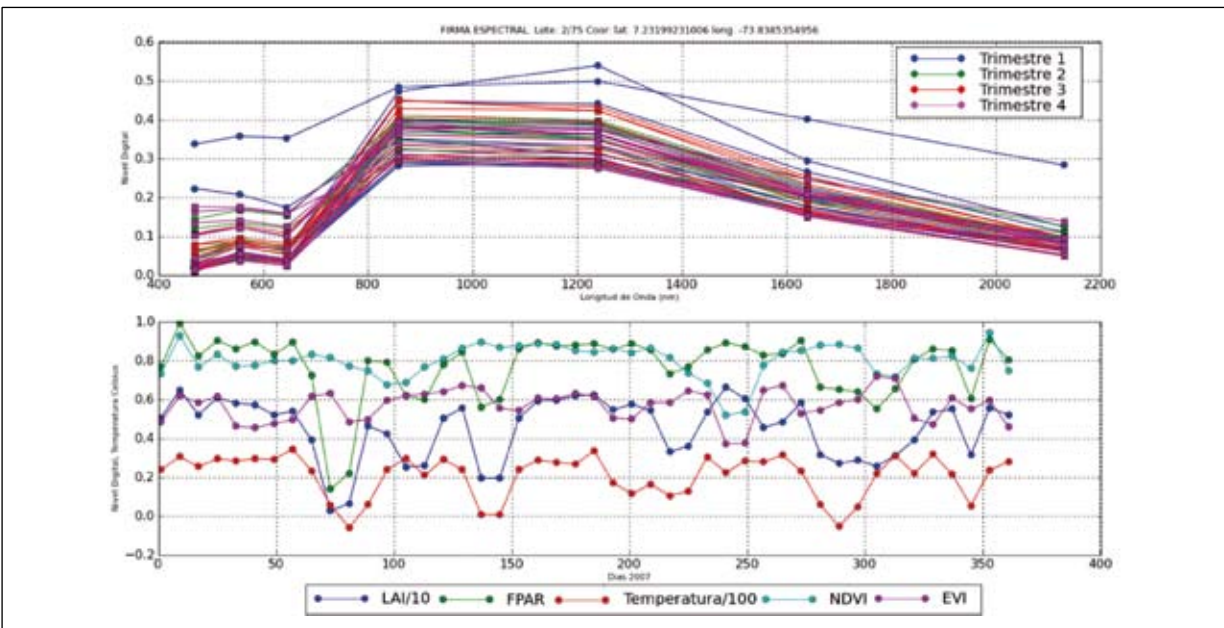


Figura 11. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote BL2.

información descriptiva asociada a cada índice de vegetación permite caracterizar propiedades fenológicas de la palma, esto es, para el caso de:

a. Índices de vegetación a partir de valores medios

Las diferencias entre los valores de las firmas espectrales no son significativos para caracterizar materiales de siembra o fechas de siembra (Figura 14).

Al observar los valores de índices de vegetación de la Tabla 4, para ambos casos de índices (NDVI y EVI) se mantienen valores promedio para cada criterio de búsqueda, lo que no permite caracterizar las propiedades fenológicas del cultivo.

b. Índices de vegetación a partir de valores modales

Los valores de la banda espectral de: 841-876 nm

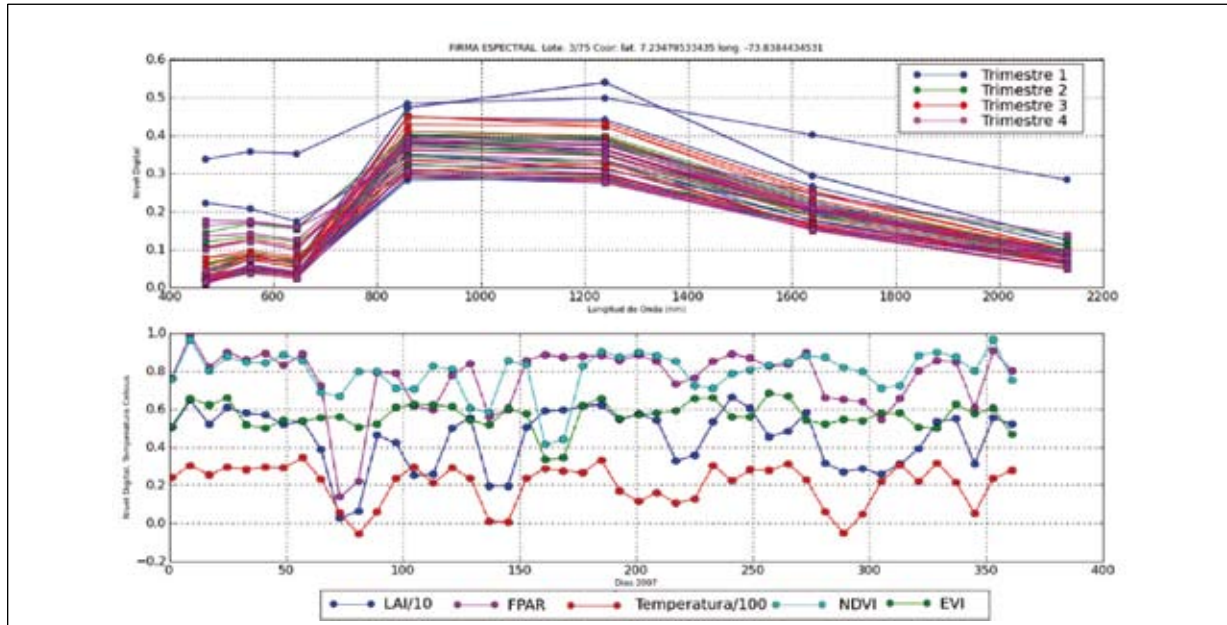


Figura 12. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote BL3.

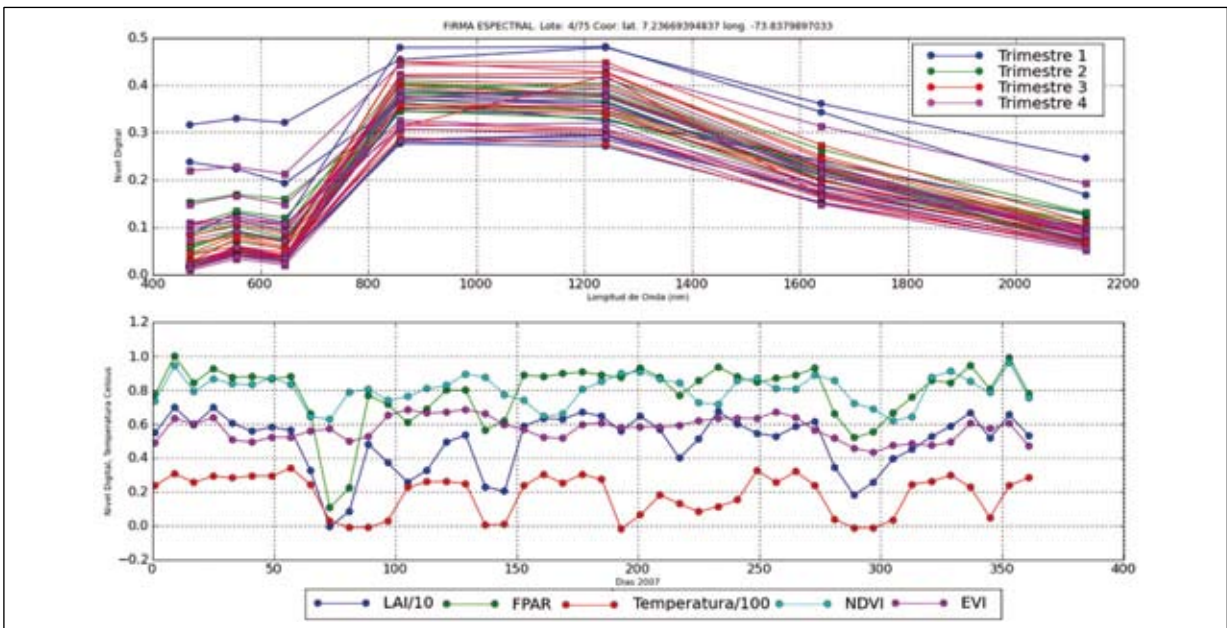


Figura 13. Cambios en la respuesta espectral y temporal durante el año 2007, Lote BL4.

y 1230-1250 nm permite identificar diferencias entre los materiales de siembra y fechas de siembra (Figura 14).

Sin embargo, los valores que diferencian las curvas espectrales son los índices de vegetación. Para este caso los índices de vegetación caracterizan mejor la propiedad de año de siembra, dada la consideración de que al aumentar los años de maduración, mayor

es el área foliar de la palma de aceite. En la Tabla 5 se ve que los valores del índice de vegetación EVI mantienen una tendencia de aumento en la medida en que el grupo de estudio cuenta con mayor tiempo de maduración. Esta misma tendencia, aunque más marcada, presenta el índice de vegetación NDVI, pero se prefiere la corrección por uso de bandas empleada por el índice EVI.

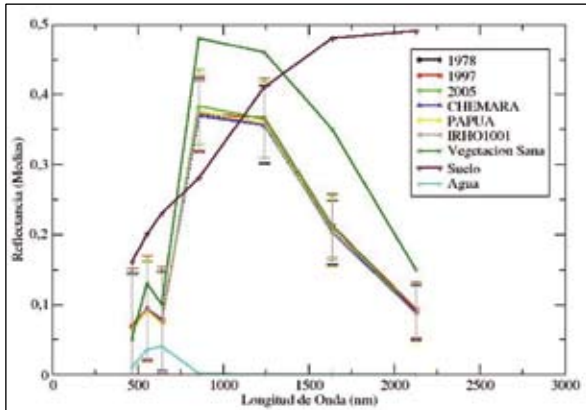


Figura 14. Firma espectral obtenida al tomar el valor de la media de las bandas del azul, verde, rojo, NIR1, NIR2, NIR3 y NIR4 para los lotes sembrados en los años 1978, 1997 y 2005, y las variedades Chemara, Hiro y Papua. Cenipalma – AP, 2009.

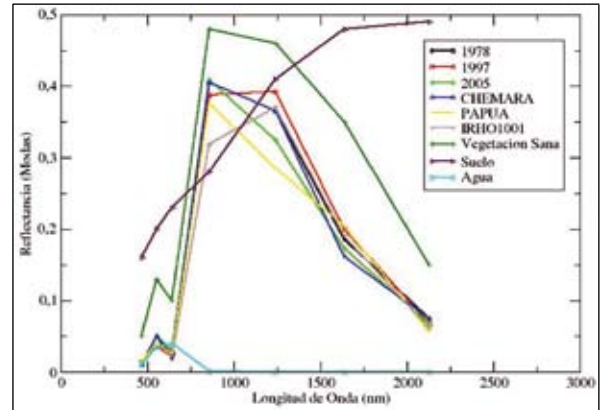


Figura 15. Firma espectral obtenida al tomar el valor de la moda de las bandas del azul, verde, rojo, NIR1, NIR2, NIR3 y NIR4 para los lotes sembrados en los años 1978, 1997 y 2005, y las variedades Chemara, Hiro y Papua. Cenipalma – AP, 2009.

Tabla 4. Valores de índices de vegetación clasificados para distintas variables fenológicas a partir de sus valores promedio.

Índice	1978	1997	2005	Chemara	Papua	lhro
NDVI	0,665	0,653	0,668	0,656	0,674	0,6645
Stdv	0,0983	0,1132	0,1112	0,0935	0,1027	0,1039
EVI	0,556	0,555	0,566	0,548	0,568	0,5614
Stdv	0,0883	0,0901	0,0886	0,0865	0,0856	0,0894

Tabla 5. Valores de índices de vegetación clasificados para distintas variables fenológicas a partir de sus valores promedio.

Índice	1978	1997	2005	Chemara	Papua	lhro
NDVI	0,9049	0,8774	0,8621	0,8841	0,8776	0,8757
Stdv	0,0983	0,1132	0,1112	0,0935	0,1027	0,0108
EVI	0,6633	0,6299	0,6280	0,6427	0,6196	0,5496
Stdv	0,0883	0,0901	0,0886	0,0865	0,0856	0,008

c. Índices de vegetación a partir de valores mínimos

Emplear las firmas espectrales con los valores mínimos obtenidos por cada banda permite caracterizar el comportamiento de cada grupo de estudio a condiciones de alta absorción de clorofila y alta absorción de humedad. Esto se encuentra asociado a la condición de una palma adulta o madura de contar con mayor índice de área foliar, lo que le permite capturar mayor humedad que una palma joven o inmadura (Figura 16).

La Tabla 6 presenta los índices de vegetación a partir de los valores mínimos en cada grupo de estudio. Estos índices reducen significativamente su respuesta respecto a los valores de promedio y moda, planteando que en altas condiciones de humedad la palma no mantiene una buena relación respecto la absorción de clorofila.

d. Índices de vegetación a partir de valores máximos

Emplear las firmas espectrales con los valores máximos obtenidos por cada banda permite caracterizar el comportamiento de cada grupo de estudio en condiciones de alta reflectancia, la cual se relaciona con los fenómenos de defoliación, representado por la baja absorción de clorofila y baja absorción de humedad (Figura 17).

Los valores presentados en la Tabla 7 permiten identificar la capacidad de los materiales de siembra por mantener una buena relación respecto al índice de vegetación. En este sentido, el material Irho presenta una mejor relación según el indicador EVI o NDVI. Caso similar, es el presentado por un cultivo con fecha de siembra joven.

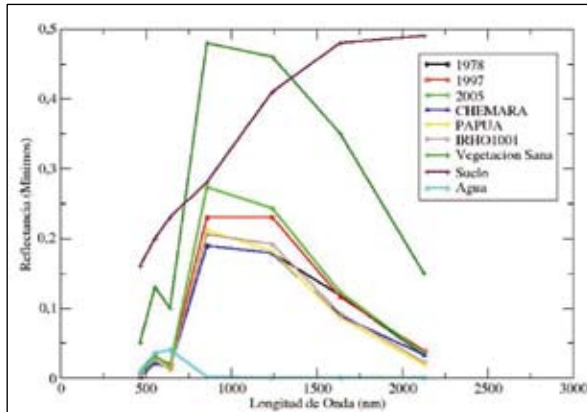


Figura 16. Firma espectral obtenida al tomar el valor de los mínimos de las bandas del azul, verde, rojo, NIR1, NIR2, NIR3 y NIR4 para los lotes sembrados en los años 1978, 1997 y 2005, y las variedades Chemara, Hiro y Papua. Cenipalma – AP, 2009

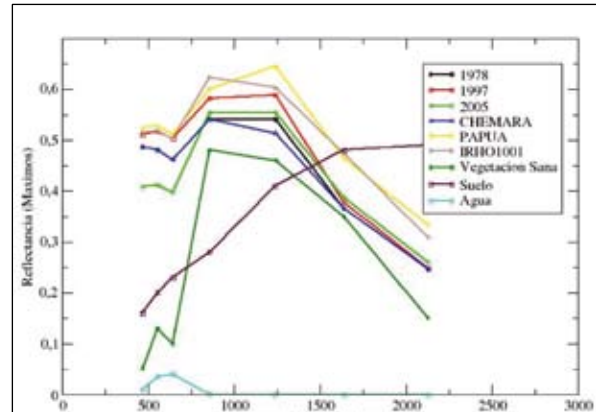


Figura 17. Firma espectral obtenida al tomar el valor de los máximos de las bandas del azul, verde, rojo, NIR1, NIR2, NIR3 y NIR4 para los lotes sembrados en los años 1978, 1997 y 2005, y las variedades Chemara, Hiro y Papua. Cenipalma – AP, 2009.

Tabla 6. Valores de índices de vegetación clasificados para distintas variables fenológicas a partir de sus valores mínimos.

Índice	1978	1997	2005	Chemara	Papua	lhro
NDVI	0,8680	0,8473	0,8880	0,8680	0,8994	0,8786
Stdv	0,0983	0,1132	0,1112	0,0935	0,1027	0,0108
EVI	0,3481	0,4025	0,4807	0,3481	0,3985	0,3819
Stdv	0,0883	0,0901	0,0886	0,0865	0,0856	0,008

Tabla 7. Valores de índices de vegetación clasificados para distintas variables fenológicas a partir de sus valores máximos.

Índice	1978	1997	2005	Chemara	Papua	lhro
NDVI	0,0790	0,0727	0,1646	0,0790	0,0808	0,1071
Stdv	0,0983	0,1132	0,1112	0,0935	0,1027	0,0108
EVI	0,3013	0,2580	0,4457	0,3013	0,3066	0,3865
Stdv	0,0883	0,0901	0,0886	0,0865	0,0856	0,008

Conclusiones

Los valores de las firmas espectrales de la Figura 15, asociadas a la moda, se presentan como las firmas características para cada set de datos estudiado. Sin embargo, es la interpretación de los índices de vegetación la que permite diferenciar las propiedades fenológicas del cultivo.

Desde el punto de vista de manejo agronómico, los valores de las firmas espectrales asociadas a fenómenos como la defoliación, se presentan como un patrón de comparación regional del problema de sanidad vegetal, para ser clasificados según la evaluación de índice de vegetación EVI.

Para el caso del cultivo de palma de aceite, en el que la estructura del Canopy mantiene un patrón uniforme, el empleo de imágenes de satélite con resolución espacial media se ajusta al desarrollo de

aplicaciones en el nivel regional y el análisis de series de tiempo. En este sentido, toma mayor importancia emplear sensores remotos que cuenten con mayor resolución espectral e índices que los relacionen, que permitan diferenciar la presencia de fenómenos como la defoliación por el ataque de insectos respecto a la presencia de enfermedades.

El presente trabajo se apoya en datos de entrenamiento o de campo para definir un modelo de la respuesta espectral que se aproxime a lo ocurrido en el campo. Sin embargo, es necesario contar con información multispectral tomada en el campo y en el laboratorio, que permita estimar en mejor medida las características biofísicas del cultivo, ajustando los parámetros de reflectancia que mejor expresan el comportamiento de la problemática de sanidad vegetal.

Aunque los sensores remotos ofrecen información del tipo espectral, el ejercicio de ajustar un modelo que

caracterice un fenómeno se soporta principalmente con los datos de entrenamiento o de seguimiento del fenómeno en el campo. En este sentido, el trabajo desarrollado abre la discusión en la interpretación y tratamiento de las series de tiempo entre las variables de campo como humedad y precipitación, y las aportadas por los sensores remotos como son: temperatura, índice de área foliar (LAI) y la radiación fotosintéticamente activa (FPAR). Eso es así, dado que son las series temporales las que aportan en el planteamiento de modelos de pronósticos.

A partir de las series históricas ajustadas sobre las áreas de estudio representativas sobre los fenómenos por caracterizar, se vienen ajustando modelos sobre

los planteamientos de la transformada rápida de Fourier (FFT) que ajuste los parámetros de la serie suavizada en el presente trabajo, según el filtro Savitsky Golay. Se trata de asociar la periodicidad de los hechos relevantes en sanidad vegetal y las variables de campo o sensores remotos asociadas.

Agradecimientos

Los autores del estudio agradecen a Fedepalma-Fondo de Fomento Palmero (FFP) por su apoyo a la investigación, al coordinador de Agronomía y líder de la Sección Agricultura de Precisión, y al Director ejecutivo de Cenipalma, por su interés en el tema.



Bibliografía

- Abdullah, A.; Umer, M. 2004. Applications of Remote Sensing in Pest Scouting: Evaluating Options and Exploring Possibilities. En: proceedings of 7th ICPA, Minneapolis, MN, USA, Julio 25-28.
- Auynirundronkool K.; Prakobya, A. 2008. Analysis of Economic Crop Reflectance by Field Spectral Signature: Case Study Sugarcane, Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization).
- Barona, E.; Girón, E. 2004. Method of Processing MODIS images for Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ciat), Cali, Colombia. US Geological Survey-EROS Data Center, Sionux Falls SD, USA.
- Belward, A. S. 1991. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. In: *Belward, A.S. & Valenzuela, C.R.*(Eds.), Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in developing countries. Kluwer, Netherlands.
- Boyer, M.; Miller, J.; Belanger, M.; Hare, E. 1988. Senescence and spectral reflectance in leaves in Northern pin Oak (*Quercus palustris* Muench.). *Remote sens. Environ*, 25, 71-87.
- COLLINS, W.1978. Remote Sensing of crop type and maturity. *Photogram. Eng. And Remote Sensing*, 44, 43-55.
- Chuvieco, E. 2000. Fundamentos de Teledetección espacial, RIALP, 568 pp.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental, Ariel Ciencia, 128 pp.
- Dengsheng, Lu., 2006, The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 27(7): 1297 - 1328
- Foody, G. 2003. Remote sensing of tropical forest environments: towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. *International Journal of Remote Sensing* 24: 4035-4046.
- Foody, G.; Boyd, D.; Cutler, M. 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment* 85: 463-474.
- Gates, D. 1965. Energy, plants, and Ecology, 46.1-13
- Gates, D. 1968. Transpiration and leaf temperature. *Annual Review of Plant Physiology* 19: 211-238.
- Goel, N. 1989. Inversion of Canopy Reflectance Models for Estimation of Biophysical Parameters from Reflectance Data. In: G. Arsar (Ed.), *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. Wiley, New York, pp. 205-251.
- Houborg R.; Soegaard H.; Boegh E. 2007. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Science Direct. Remote Sensing of Environment* 106: 39-58.
- Hurtado C., Rafael. 1999. Universidad de Alcalá de Henares.
- Helmi, Zulhaidi, *et al.* 2009. Hyperspectral Imagery for Mapping Disease Infection in Oil Palm Plantation Using Vegetation Indexes and Red Edge Techniques. *American Journal of Applied Sciences* 6(6): 1031-1035.
- Hyman, G.; Meneses, C.; Barona, E.; Giron, E.; Perea, C. 2006. Satellite Imagery and Information Networks for Monitoring Climate and Vegetation in Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ciat), Cali, Colombia. US Geological Survey-EROS Data Center, Sionux Falls SD, USA.



- Jackson, R. D.; Huete, 1991. Interpreting vegetation indexes. *Preventive Vet, Med.* 11:185-200.
- J. Chen, P. Jhonsson; M. Tamura, Z. Gu, B. Matsushita, and L. Eklundh, "A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter," *Remote Sens. Environ.*, vol. 91, no. 3/4, pp. 332-344, 2004.
- Levesque, J.; King, D. J. 1999. Airborne digital camera image semivariance for evaluation of forest structural damage at an acid mine site. *Remote Sensing of Environment* 68: 112-124.
- Lorenzen, B.; Jensen, A. 1989. Changes in leaf spectral properties induced in Barley by cereal powdery Mildew. *Remote sens. Environ* 27: 201-209.
- Lu, D.; Mausel, P.; Brondizio, E.; Moran, E. 2004. Relationships between forest stand parameters and Landsat Thematic Mapper spectral responses in the Brazilian Amazon basin. *Forest Ecology and Management* 198: 149-167.
- Lu, D.; Batistella, M. 2005. Exploring TM image texture and its relationships with biomass estimation in Rondonia, Brazilian Amazon. *Acta Amazónica* 35: 261-268.
- Lu, D.; Batistella, M.; Moran, E. 2005. Satellite estimation of aboveground biomass and impacts of forest stand structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71: 967-974.
- Lukman F.; Siahaan, M. 1992. Nutrient Status and Phytosanitary Condition Study for Oil Palm by Using Remote Sensing Technology. Indonesian Oil Palm Research Institute.
- Lukman, F.; Poeloengan, Z. 1992. Application of Remote Sensing Technique for Oil Palm Plantation Management. M. Lukman Fadli. Indonesian Oil Palm Research Institute (IOPRI) Indonesia.
- Lukman, M.; Poeloengan. 1996. Application of remote sensing technique for oil palm plantation management. *En: Proceedings of the 1996 PORIM International Palm Oil Congress (Agriculture)* p. 460-467.
- Malthus, T.J.; Madeira, A.C. 1993. High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by *Botrytis fabae*. *Remote sens. Environ.* 45: 107-116.
- Meer, F.; Jong, S. 2002. *Imaging Spectrometry. Remote Sensing and Digital Image Processing.* Kluwe Academic Publishers. 4: 111-197.
- Nelson, R.F.; Kimes, D.S.; Salas, W.A.; Routhier, M., 2000a, Secondary forest age and tropical forest biomass estimation using Thematic Mapper imagery. *Bioscience*, 50, pp. 419-431.
- Nordin, L. 1996. Application of Airsar to Oil Palm Tree Characterization. Malaysian Centre For Remote Sensing (MACRES) Malaysia.
- Ross, J. 1981, *The Radiation Regime and Architecture of Plants Stands.* Dr W. Junk Publishers, London.
- Roy, P.S.; Ravan, S.A., 1996, Biomass estimation using satellite remote sensing data an investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Bioscience* 21: 535-561
- Sanger, J. E. 1971. Quantitative investigation of leaf pigments from their inception in buds through autumn coloration to decomposition in falling leaves. *Ecology* 52: 1075-1089.
- Slatyer, R.O. 1967. *Plant-Water relationships.* Academic Press, London.
- Steininger, M.K. 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest aboveground biomass data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing* 21: 1139-1157.
- Thenkabail, P.S.; Stucky N.; Griscom W.; Ashton M.S.; Diels J.; Vander M.; Enclonae B. 2004. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African Derived savannas using IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing* 25(23): 5447-5472.
- Verdebout, J.; Jacquemound, S.; Schmuck, G. 1994. Optical properties of leaves: modeling and experimental studies. I. Hill, J. & j. & MÉGIER, j.(eD.) *Imaging Spectrometry -a Tool for Environmental Observations*, ECSC, EEC, EAEC, Brussels and Luxembourg, pp. 169-191.
- Zheng, D.; Rademacher, J.; Chen, J.; Crow, T.; Bresse, M.; Le Moine, J.; Ryu, S., 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM + data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment* 93: 402-411.