

**MONITOREO REMOTO DE SUELOS PRODUCTIVOS MEDIANTE  
LEVANTAMIENTO MULTIESPECTRAL****REMOTE MONITORING OF PRODUCTIVE SOILS BY MEANS OF  
MULTISPECTRAL SURVEY**

**MSc. Diego Pelaez Carrillo\*, PhD. Oscar Gualdron Guerrero\*  
PhD. Leónides Castellanos González\*\***

**\* Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Programa de  
Ingeniería Electrónica.

Km 1 Vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

E-mail: {diego.pelaez, oscar.gualdron}@unipamplona.edu.co.

**\*\* Universidad de Pamplona**, Facultad de Ciencias Agrarias, Programa de Ingeniería  
Agronómica.

Km 1 Vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

E-mail: leonides.castellanos@unipamplona.edu.co.

**Resumen:** El levantamiento multiespectral se presenta como una alternativa de monitoreo remoto no invasivo, en el cual, por medio de la adquisición de imágenes en espectros de luz visible y no visible, proporcionan información respecto a la cantidad de material biológico presente en las áreas de tierra muestreada gracias a la implementación de un algoritmo que calcula los índices de vegetación de diferencia normalizada de las imágenes adquiridas. En el actual artículo se presenta los resultados de implementar una metodología de adquisición remota de información por medio de levantamientos multiespectrales, dicha recopilación se realizó en 15 predios ubicados en el municipio Tuta en el departamento de Boyacá, Colombia en dos momentos de intervención importantes, antes y después de implementar modelos agroecológicos, con el objetivo de comparar e identificar características importantes del suelo estudiado y como son afectados por la implementación de actividad agrícola. Dichas imágenes son procesadas generando ortofotomosaicos multiespectrales, para posteriormente ser analizadas individualmente, para después por medio de un análisis estadístico generar modelos polinomial que puedan mostrar el comportamiento de la cantidad de material vegetal. Dentro de los resultados mas importantes se consideran las diferencias del comportamiento de área cubiertos por cada nivel de cantidad de vegetación y la identificación indirecta de los niveles de estrés hídricos y la calidad del material biológico.

**Palabras clave:** NDVI, Análisis estadístico polinomial, imágenes multiespectrales, Caracterización de suelo, procesamiento de imágenes.

**Abstract:** The multispectral survey is presented as a non-invasive remote monitoring alternative, in which, by means of the acquisition of images in visible and non-visible light spectra, they provide information regarding the amount of biological material present in the sampled land areas thanks to the implementation of an algorithm that calculates the normalized difference vegetation indices of the acquired images. The present article presents the results of implementing a remote information acquisition methodology by means of multispectral surveys. This collection was carried out in 15 properties located in the municipality of Tuta in the Department of Boyacá, Colombia

in two important moments of intervention, before and after implementing agro-ecological models, with the aim of comparing and identifying important characteristics of the soil studied and how they are affected by the implementation of agricultural activity. These images are processed by generating multispectral orthophotomosaics, to be later analyzed individually, and then through a statistical analysis generate polynomial models that can show the behavior of the amount of plant material. Among the most important results are considered the differences in the behavior of the area covered by each level of vegetation quantity and the indirect identification of the levels of water stress and the quality of the biological material.

**Keywords:** NDVI, Polynomial statistical analysis, multispectral imaging, soil characterization, image processing.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las imágenes multiespectrales se logran gracias a la adquisición de imágenes monocromáticas tomadas por sensores configurados para ser sensibles ante una longitud de onda visible o no visible muy específica denominada banda (Sun et al., 2018), el actual desarrollo de las tecnologías de teledetección con este tipo de herramientas proporciona alternativas eficientes que se pueden utilizar en el monitoreo de cultivos de gran extensión considerándose como una estrategia muy poco usual (C. Liu et al., 2017).

Las cámaras multiespectrales manejan varios tipos de bandas espectrales descritas cuya selección de bandas se realiza utilizando dos diferentes métodos para establecer diferentes bandas específicas, por filtro o por envoltura (Verrelst et al., 2016), el producto final de las imágenes multiespectrales es un conjunto de imágenes correspondiente a la cantidad de bandas diferentes con los que se cuente (Logofătu & Damian, 2019). El análisis de las imágenes se puede realizar por medio de métodos estadísticos ya sean supervisados o no supervisados, ambos métodos dividen las imágenes por píxeles y los agrupan por características similares y etiquetarlos de tal forma que el algoritmo de clasificación cuente con el material muestra y la clase a la que pertenece, los no supervisados no requieren de etiquetar las muestras aunque puede perder la correlación que desea el programador entre el grupo y las clases (Cui et al., 2016).

Gracias al gran interés por obtener o desarrollar herramientas para predecir parámetros en tiempo real se han desarrollado herramientas bajo imágenes espectrales (Pu et al., 2015), con el fin de realizar inspecciones no invasivas dentro de los cultivos (Nandibewoor et al., 2015). Es una técnica bastante nueva, pero promete resultados muy exactos (Gongal et al., 2015). El éxito del uso de

este tipo de sensores se encuentra asociado a un proceso de calibración exhaustivo con el fin de recolectar una data precisa (Luhmann et al., 2016). Este método de adquisición de información es ampliamente utilizado en proceso de control de calidad e inspección de producción de alimento, debido a que es una técnica no destructiva, pero al ser una tecnología relativamente nueva presenta dos grandes inconvenientes como lo son el alto costos de los sistemas para poder ser implementado y además es una gran cantidad de datos que se adquieren un tiempo muy reducido lo que hace necesario un alto poder computacional que logre procesar dicha información a una velocidad razonable (Calvini et al., 2017).

La tele-observación realizada por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV) tienen el potencial de mejorar la recolección de datos por la cercanía que se tiene con los cultivos obteniendo un gran número de datos, por medio de cámaras de alta resolución (S. Liu et al., 2018). La detección remota por medio de cámaras multiespectrales implementadas en UAV son ampliamente utilizadas para determinar parámetros agronómicos, clasificación de cultivos y todo lo relacionado con agricultura de precisión debido a su alta resolución que se encuentra entre 1 y 1,5 cm por píxel y con alturas de adquisición de 24 a 100 m (Su et al., 2018).

Este proyecto se realiza con la finalidad de analizar los resultados del levantamiento multiespectral hecho en los 15 predios beneficiarios del municipio de Tuta en el departamento de Norte de Santander Colombia, para cada una de las locaciones se presentan las imágenes con su debida georreferenciación, además se agrupan los resultados de los porcentajes de áreas cubiertos, en siete intervalos en los cuales se categorizan los índices de vegetación de diferencia normalizada condensada en una tabla mostrada por predio, es importante destacar que dicha información se

complementa con la comparación entre los índices del primer levantamiento y el segundo, los intervalos de índices más bajos no son asociados a indicadores que puedan representar un riesgo inmediato por lo contrario representan diferentes elementos que ayudan a describir con más certeza los hallazgos del terreno muestreado. A demás se realiza por cada predio un análisis estadístico en el que se evidencie en mayor medida la evolución de los datos brindando un insumo importante en la observación de los cambios generados en el terreno de acuerdo con la implementación de los modelos agroecológicos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo del proceso de investigación se desenvuelven distintas actividades que permiten resolver la problemática principal entre ellos se encuentra la toma de los datos necesarios para realizar un procesamiento de imágenes exitoso. Lo principal para este caso es la selección del sensor teniendo en cuenta variables como la cantidad de bandas disponibles, el peso, interfaz de conexión y capacidad de almacenamiento. La cantidad de bandas determina los alcances y la cantidad de información disponible para un procesamiento posterior. Las condiciones del terreno y del clima donde se realiza la toma de imágenes son otras características que limitan la selección. La resolución y la interfaz de conexión facilitan la recolección y almacenamiento de la información, las características de hardware son factores que están directamente relacionados con el tiempo de vuelo del UAV, por lo que también se convierte en un criterio de selección influyente dadas las características de la zona rurales donde se desarrolla la investigación.

Por lo cual se determina como sensor multiespectral el denominado RedEdge-M, del fabricante Micasense que cuenta con cinco bandas espectrales en las que se incluye la banda azul, verde, roja, borde de rojo e infrarrojo cercano y además se resalta una gran resolución de 0.08 m por píxel a una altura de 120 m sobre el nivel de la tierra. Este sensor se integra a un UAV inspire 1 de la marca DJI cuya característica más importante es ofrecer una gran estabilidad y control de vuelo ofreciendo una gran ventaja a la hora de realizar el proceso de la adquisición de las imágenes multiespectrales.

### 2.1. Adquisición y almacenamiento

El proyecto de investigación se desarrolló en el municipio de Tuta en el departamento de Boyacá

Colombia, en el cual se escogieron 15 predios, se escogieron aproximadamente una hectárea de tierra cada una y con diferentes condiciones vegetales aún sin identificar, a cada uno de ellos inicialmente se realizó el respectivo levantamiento topográfico, obteniendo los diferentes puntos GPS que limitan el polígono que representar la ubicación del área seleccionada, teniendo en cuenta que el área muestreada debe ser mayor que el área de interés con el fin de proyectar el plan de vuelo, dicho plan prevé el área total que se debe sobrevolar y a qué velocidad realizara el recorrido con el fin de definir el tiempo de vuelo y de esta forma definir las baterías necesarias y en cuantos sobrevuelos se logra la totalidad de la trayectoria programada, se hace imprescindible prestarle atención al traslape de las imágenes y la distancia entre las capturas sucesivas dichas configuraciones deben asegurarse una superposición del 75%, además se configura la altitud de vuelo de 122 metros para la toma de las muestras.

Se debe tener en cuenta que la inclinación frontal a lo largo de la dirección de vuelo también depende de la velocidad del vuelo y la altitud sobre el suelo. De acuerdo con las características del sensor, es posible capturar imágenes aproximadamente una vez por segundo. Sin embargo, hay combinaciones de altitud de vuelo y velocidad de vuelo que no producirán una adecuada contraparte frontal. Se deben usar velocidades más lentas a altitudes de vuelo más bajas, La superposición adecuada es extremadamente importante para obtener datos de buena calidad. La primera adquisición de imágenes se realizó en el momento inicial de la investigación donde no se hizo ningún tipo de intervención humana en el terreno y la segunda días des pues de preparar el terreno y posterior siembra de las plantas.

### 2.2. Procesamiento de las imágenes multiespectrales

En el mercado existe varios softwares dedicados exclusivamente a la fotometría, para la aplicación se escogió el software PIX4D, gracias a su alta precisión y fácil procesamiento de la información adquirida, es importante destacar que en el preprocesamiento de las imágenes se debe tener en cuenta que cada una de ellas llevan asociadas unos metadatos con la información geográfica de la ubicación donde fue adquirida por lo cual es importante evitar alterar las imágenes adquiridas anteriormente.

El software permite facilitar en grandes proporciones el procesamiento de imágenes multiespectrales a comparación con los softwares

libres que también se pueden utilizar para el procesamiento de imágenes, estos últimos además de su dificultad para la carga de los datos, en muchas ocasiones no permite crear el ortofotomosaico multiespectral que facilita la ubicación y la identificación de puntos críticos en el área de adquisición.

El procesamiento de las imágenes multiespectrales nos permite determinar el NDVI cuyos valores son la variable de estudio de la investigación, este índice arrojan como resultado una imagen policromática, donde cada pixel entrega un color dependiendo del valor de NDVI presente en ese punto de la imagen, además el rango de colores asociados y la gama de colores utilizados para su representación y por último una tabla en la que se relaciona cada uno de los colores utilizados dentro de la imagen, el rango de valores de NDVI que representa, el área total cubierto por los valores de NDVI dentro del rango y el porcentaje de área cubierto por dichos índices.

### 2.3. Análisis estadístico

Teniendo en cuenta investigaciones anteriores, se logra establecer tipos de cobertura de acuerdo con rangos de valores del índice procesado. En otras palabras, la densidad de cobertura alta está dada por valores de NDVI entre 0,75 y 1, la densidad de cobertura media por valores entre 0,5 y 0,75 y la densidad de cobertura baja por valores entre 0 y 0,5. Para cada uno de los predios se establece el porcentaje de área cubierto por cada uno de los rangos de densidad de vegetación.

La idea principal del análisis estadístico es implementar métodos matemáticos que permitan cuantificar los datos adquiridos e identificar un modelo de tendencia que prediga el comportamiento de nuevos valores. El análisis se realizó en el software de Matlab el cual nos permite manipular la base de datos anteriormente descrita y que se encuentra conformada por una matriz de 3 filas que representan los tres diferentes rangos de NDVI para el primer levantamiento multiespectral y 3 filas adicionales para el segundo levantamiento y N columnas que dependen del número de predios en los cuales se realizó el estudio y que para cada fila presentan los datos de porcentajes de área que se encuentran cubiertos por los mismos.

Para cada uno de los diferentes rangos se procede a identificar por fila empezando por el rango alto un primer acercamiento del comportamiento de los datos obtenidos y en el que se pudo identificar de manera minuciosa los valores atípicos o que son notablemente diferentes, no correspondían a un comportamiento normal de acuerdo al grupo que se

estuvo analizando, también se pudo identificar valores faltantes o de mediciones erróneas, los datos ruidosos muestran variaciones aleatorias alrededor de los valores esperados es por esto que antes de proceder a crear un modelo fue necesario realizar un proceso de filtrado y suavizado de tal forma que se empiecen a mostrar las características principales.

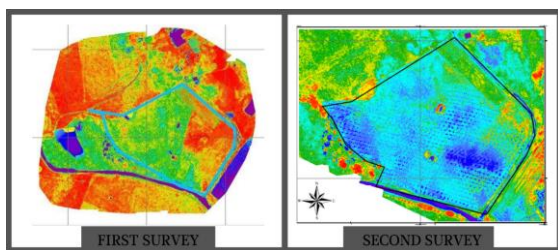
Los modelos polinómicos son maneras simples de ver tendencias al alta y a la baja de los datos de porcentaje de cobertura de los valores altos de NDVI. Este mismo procedimiento fue realizado para las filas que representa los rangos medios y bajo, por último, se superponen los tres modelos para comparar las generalidades y concluir en las características generales de los suelos de los ocho municipios.

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

El sensor permitió adquirir la información de la cantidad de radiación electromagnética absorbida por la vegetación presente en el suelo muestreado gracias a los dos sensores seleccionados en los dos momentos de adquisición de información es decir antes de iniciar el proceso de siembra y preparar el terreno para albergar cultivos y después de dar inicio al cultivo. Para cada uno de los predios se generaron los ortofotomosaicos multiespectrales en los cuales se calcularon los índices NDVI adquiridos en los diferentes momentos permitiendo un análisis individual de cada predio especificando las características de la vegetación por medio de los porcentajes de área cubiertos por los diferentes niveles de reflectancia electromagnética en el predio en los dos muestreos, dichos niveles se pudieron agrupar de acuerdo a la cantidad y calidad de vegetación permitiendo establecer tres rangos denominados vegetación alta, vegetación media y vegetación baja. Los porcentajes de cobertura de área de cada uno de los rangos se grafican con el objetivo de observar la evolución de los datos del predio individualmente, y se realizaron unas consideraciones generales en la cual se identifican las tendencias mostradas a partir de la información de la gráfica en la que se pudo demostrar que en la mayoría de los terrenos muestreados la implementación de cultivos genera una disminución considerable de los niveles de reflectancia electromagnética, debido a que se disminuye considerablemente la superficie con capacidad de reflejar las ondas considerablemente y por consecuencia aumento de los porcentajes de área con niveles de NDVI bajos.

Los resultados adquiridos nos proporciona una mirada global de la evolución de la cobertura vegetal a la que se enfrentan los terrenos de acuerdo con las medidas que se han tomado en el mismo hasta el momento afirmando los resultados de la investigación realizada por la Universidad Agrícola de China y la Universidad de Queensland en Australia en su investigación sobre monitoreo dinámico de NDVI (Duan et al., 2017) donde nos demuestran también el alto rendimiento del sistema de sensores seleccionado para la caracterización de suelos y seguimiento de los cambios en los datos.

En las figuras 1 y 2 donde se realiza una comparación entre el levantamiento multiespectral realizado antes de iniciar el proceso de siembra y preparar el terreno para albergar cultivos y después de dar inicio al cultivo. Para cada uno de los predios los ortofotomosaicos multiespectrales adquiridos en los diferentes momentos, además gráfica de los datos establecidos en las tablas clasificación de los intervalos de NDVI mostradas en la sección anterior, donde se condensan los porcentajes de cobertura para cada una de las categorías, se realizan unas consideraciones generales en la cual se consideran las tendencias a partir de la información mostrada, y por último se expone toda la información recopilada en el municipio y se representa en una gráfica que proporciona una mirada global de la evolución de la cobertura vegetal a la que se enfrentan los terrenos de acuerdo con las medidas que se han tomado en el mismo hasta el momento.



*Fig. 1. Imagen comparativa de los levantamientos multiespectrales predio 1.*

En la figura 1 se realiza una comparación entre la imagen multiespectral adquirida al inicio de la investigación y la adquiridas en un momento posterior condensando la información en ortofotomosaicos. para cada uno de los quince predios se realizó la respectiva comparación de los resultados de sus respectivos procesamientos. Para los diferentes predios se pueden realizar unas primeras afirmaciones en base a diferentes observaciones que se presentaron en la mayoría de los datos obtenidos que demuestran que las características de baja cobertura aumentaron

considerablemente disminuyendo la representación en los demás intervalos de NDVI, esto debido a la implementación de los cultivos. Es importante destacar además que la disminución de la presencia de índices de cobertura altamente optimas bajo considerablemente en todos los predios analizados además se encuentran datos en el segundo levantamiento que representan presencia de material rocoso y huella hídrica.

#### 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El objetivo principal de la actividad comparativa es dar a conocer el comportamiento de la variable de estudio producto de la actividad de caracterización de suelos por medio de imágenes multiespectrales adquiridas de los diferentes municipios. La meta principal del mencionado análisis es poder identificar el posible modelo de las tendencias presentes en los datos, dando la posibilidad de predecir la aparición de valores nuevos. Para poder cumplir con dicha posibilidad fue necesario involucrar cierto número de componentes estándar en este tipo de cálculos, los datos utilizados en el análisis estadístico fueron los porcentajes de área cubiertos de la totalidad de los predios, el estudio es realizado agrupando los NDVI en resultados de cobertura altos, medios y bajos obteniendo los modelos del comportamiento de los datos y luego agrupar los resultados con el fin de comparar los datos y determinar el grupo en el cual se encuentran el mayor porcentaje de cobertura.

Paralelamente a esta investigación se presenta también la realizada por El Centro de Estudios Ecológicos en Ereván, Armenia y la Universidad de Pavía, Italia, donde relaciona los factores climáticos con los resultados de índices de NDVI (Muradyan et al., 2019), presentando como resultados principales impacto favorable de factores como lluvia leves y temperaturas medias favorecen el crecimiento de la vegetación, por lo contrario los resultados de la investigación actual demuestran que posterior a la agrupación de datos de los diferentes predios permite realizar unas primeras afirmaciones en base a diferentes observaciones que se presentaron en la mayoría de los modelos obtenidos que demuestran que las características de baja cobertura aumentaron considerablemente disminuyendo la representación en los demás intervalos de NDVI, esto debido a la implementación de los cultivos o la actividad humana en los suelos muestreados.

##### 4.1. Cobertura alta



Los resultados del análisis de los datos de los quince predios del municipio de Tuta se muestran en la figura 2, cada punto de color azul es el porcentaje de área que se encuentra cubierto por valores de NDVI entre 0,75 y 1 que son clasificados como valores de densidad de cobertura vegetal alta. En la parte izquierda de la imagen se observa de color rojo la curva representativa del comportamiento de los datos del primer levantamiento multispectral y en la cual nos podemos dar cuenta que para ese primer periodo de muestreo la tendencia se concentró en porcentajes de cobertura superiores a 50% e inferiores a 90%, indicando que en la totalidad de los predios predominaban este tipo de índices, por lo contrario en la zona derecha de la imagen se presenta la gráfica de los valores de cobertura de los predios del segundo levantamiento multispectral, donde se destaca que la curva polinomial se centra en valores de porcentaje de área inferiores a 25% y superiores a 0% y por consecuencia demuestran que hubo una reducción importante en la cobertura vegetal de densidad alta.

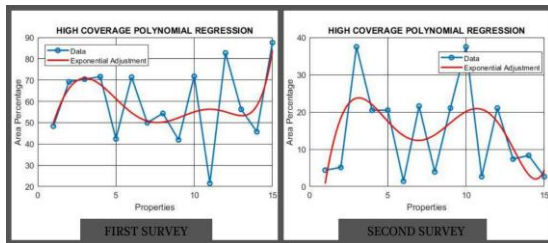


Fig. 2. Modelo polinomial cobertura alta.

#### 4.2. Cobertura media

En la figura 3 se observan los modelos polinomiales de los dos momentos de muestreos de la superficie de los predios, teniendo en cuenta solo los NDVI entre 0,75 y 0,5 es decir cobertura vegetal con densidad media. Inicialmente se evidencia que la coordenada “x” representa cada uno de los predios beneficiarios del proyecto y la coordenada “y” indica el porcentaje de área cubierto por los NDVI medios. La curva de ajuste exponencial del primer levantamiento multispectral se centra en valores de porcentaje de cobertura entre 45% y 15% que comparando con los resultados de la figura 3 se puede asegurar que son los segundos porcentajes de cobertura vegetal con más representación en cada predio. Por otro lado, la curva representativa del segundo levantamiento multispectral muestra un comportamiento similar al de primer levantamiento multispectral, aunque con un leve decremento poco evidente.

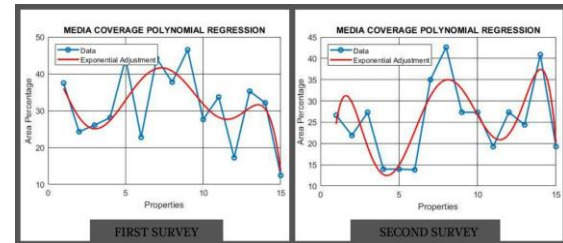


Fig. 3. Modelo polinomial cobertura media.

#### 4.3. Cobertura baja

El cambio más relevante en la cobertura vegetal que se muestra en la figura 4, donde se comparan los porcentajes de cobertura del suelo cubierto por valores de NDVI entre 0,5 y 0 (densidad de cobertura vegetal baja) del primer y segundo levantamiento multispectral. Una de las principales características de los datos adquiridos en el primer levantamiento es el hecho de que en casi la totalidad de los predios se el porcentaje de área cubierto por este tipo de densidad de cobertura fue inferior al 15%, es decir, no se contaba con gran cantidad de suelo desnudo en cada predio. Sin embargo, en el segundo levantamiento el cambio fue significativo donde se presentan porcentajes de cobertura entre 65% y 45% valores bastante altos y los cuales provocan que el ajuste exponencial tenga una alta representación en porcentajes iguales a 52%, por este motivo se puede asegurar que en el segundo levantamiento multispectral predominan los suelos sin ningún tipo de cobertura es decir suelo desnudo o con una vegetación de altura muy reducida.

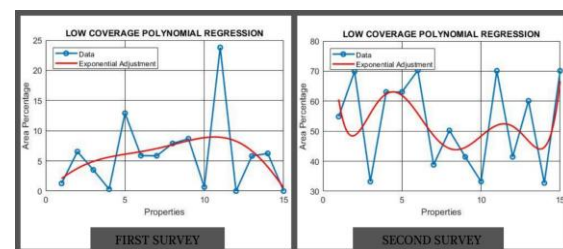


Fig. 4. Modelo polinomial cobertura baja.

#### 4.4. Relación entre los tres tipos de cobertura

Con el propósito de tener una visión global del comportamiento total de la variable de estudio, se realiza la superposición de los ajustes exponenciales obtenidos en los ítems 4.1, 4.2 y 4.3 relacionándola en la gráfica 5 que se muestra a continuación, en la cual se identifica de forma más evidente las diferencias entre el primer y segundo levantamiento multispectral y de manera análoga

el comportamiento de los diferentes niveles de densidad de material vegetal, se destaca que los modelos predictivos con mayor porcentaje de área cubierta son los de densidad de cobertura alta tanto del primero como del segundo levantamiento, en la zona inferior de la gráfica se ubica el modelo de cobertura baja del primer levantamiento como consecuencia de su baja representación en los diferentes predios, seguido del modelo de cobertura baja del segundo levantamiento que se combina con los modelos de cobertura media de los dos levantamientos.

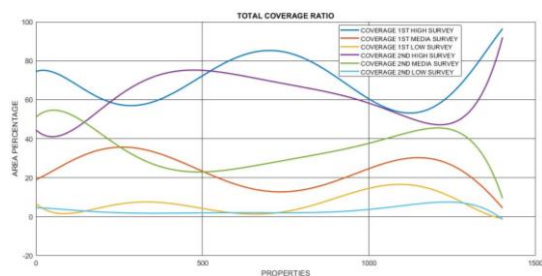


Fig. 5. Relación entre los modelos polinomiales de los diferentes niveles de cobertura.

En el primer levantamiento multiespectral el promedio de los porcentajes área cubiertos por una densidad vegetal alta era un poco superior al 58,99% para el segundo levantamiento se presenta una reducción igual a 15,2% en el promedio calculado del mismo nivel de densidad vegetal. Por otra parte, los porcentajes de área cubiertos por una densidad vegetal media permanecieron constantes en un valor redondeado a un 28%. Finalmente, los porcentajes de área característicos de una densidad vegetal baja presentaron un aumento en el segundo levantamiento multiespectral con respecto al primero igual a 46,44%.

## CONCLUSIONES

El sistema de percepción óptico logra realizar una captura de información de acuerdo con las características deseadas para la creación de una base de datos acorde a la información que se desea de cada uno de los predios beneficiarios del proyecto realizando una excelente teledetección. El proceso de cuantificación de la reflectancia de las bandas espectrales infrarrojo cercano y rojo visible se pudo realizar de tal forma que se calcularon los índices de vegetación de diferencia normalizada para cada píxel de los ortofotomosaicos multiespectrales.

Los anteriores datos demuestran que utilizando esta herramienta de monitoreo se establece una relación entre la reducción de los porcentajes de área cubiertos por material biológico y la

implementación de la actividad agrícola como una de las causas de la aparición de una gran proporción de área con suelo desnudo, este resultado es un aporte a las investigaciones que se vienen realizando respecto a la aplicabilidad de las imágenes multiespectrales en la caracterización de suelos.

## REFERENCIAS

- Calvini, R., Amigo, J. M., & Ulrici, A. (2017). Transferring results from NIR-hyperspectral to NIR-multispectral imaging systems: A filter-based simulation applied to the classification of Arabica and Robusta green coffee. *Analytica Chimica Acta*, 967, 33–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.03.011>
- Cui, Z., Wang, Y., Gao, X., Li, J., & Zheng, Y. (2016). Multispectral image classification based on improved weighted MRF Bayesian. *Neurocomputing*, 212, 75–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.03.097>
- Duan, T., Chapman, S. C., Guo, Y., & Zheng, B. (2017). Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210, 71–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>
- Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., & Lewis, K. (2015). Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 8–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.021>
- Liu, C., Hao, G., Su, M., Chen, Y., & Zheng, L. (2017). Potential of multispectral imaging combined with chemometric methods for rapid detection of sucrose adulteration in tomato paste. *Journal of Food Engineering*, 215, 78–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.026>
- Liu, S., Li, L., Gao, W., Zhang, Y., Liu, Y., Wang, S., & Lu, J. (2018). Diagnosis of nitrogen status in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using in-situ hyperspectral data and unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 185–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.026>
- Logofătu, P. C., & Damian, V. (2019). Snapshot

- interferometric multispectral imaging using deconvolution and colorimetric fit. *Optics & Laser Technology*, 111, 100–109.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlas.2018.09.008>
- Luhmann, T., Fraser, C., & Maas, H.-G. (2016). Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 37–46.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>
- Muradyan, V., Tepanosyan, G., Asmaryan, S., Saghatelian, A., & Dell'Acqua, F. (2019). Relationships between NDVI and climatic factors in mountain ecosystems: A case study of Armenia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 158–169.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.03.004>
- Nandibewoor, A., Hebbal, S. B., & Hegadi, R. (2015). Remote Monitoring of Maize Crop through Satellite Multispectral Imagery. *Procedia Computer Science*, 45, 344–353.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.158>
- Pu, H., Kamruzzaman, M., & Sun, D.-W. (2015). Selection of feature wavelengths for developing multispectral imaging systems for quality, safety and authenticity of muscle foods-a review. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 86–104.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.05.006>
- Su, J., Liu, C., Coombes, M., Hu, X., Wang, C., Xu, X., Li, Q., Guo, L., & Chen, W.-H. (2018). Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 157–166.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comp.ag.2018.10.017>
- Sun, B., Yuan, N., Cao, C., & Hardeberg, J. Y. (2018). Design of four-band multispectral imaging system with one single-sensor. *Future Generation Computer Systems*, 86, 670–679.  
<https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2018.04.056>
- Verrelst, J., Rivera, J. P., Gitelson, A., Delegido, J., Moreno, J., & Camps-Valls, G. (2016). Spectral band selection for vegetation properties retrieval using Gaussian processes regression. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 554–567.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.016>