




Sistemas de información, zonificación y georreferenciación (agricultura de precisión)

Artículo de investigación científica y tecnológica

Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo

 Lou Bonnaire Rivera¹,  Bibiana Montoya Bonilla¹,
 Francisco Obando-Vidal^{1*}

¹Corporación universitaria Comfacauca - Unicomfacauca. Popayán, Colombia.

*Autor de correspondencia: Corporación universitaria Comfacauca - Unicomfacauca. Calle 4 N° 8-30. Popayán, Colombia. fobando@unicomfacauca.edu.co

Editor temático: Juan Manuel Rodríguez Rondón (Cartografía Temática de Colombia S.A.S. [Biogeomática])

Recibido: 29 de agosto de 2019

Aprobado: 08 de octubre de 2020

Publicado: 23 de abril de 2021

Para citar este artículo: Bonnaire Rivera, L., Montoya Bonilla, B., & Obando-Vidal, F. (2021). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), e1578. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578



Resumen

El café es un producto importante en la economía colombiana que aporta en alto grado a los ingresos de los agricultores en el departamento de Cauca, quienes buscan aumentar su rentabilidad mediante procesos diferenciados en el cultivo y valor agregado en la cosecha. En la actualidad, el manejo agronómico se hace de manera tradicional y por plantas al azar, lo que limita la visión general del estado del lote. La agricultura de precisión es una herramienta que hace más confiable el manejo del cultivo al considerar sus diferentes características agroclimáticas. El presente estudio evidencia el uso de imágenes multiespectrales del terreno tomadas con drones para determinar de forma temprana el estado nutricional de las plantas. Como resultado, se consolidó un sistema de información que permitió el procesamiento de imágenes por medio de un algoritmo que calcula el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por su sigla en inglés). En el cultivo de café variedad Castillo se alcanzaron valores de NDVI superiores a 0,8. Al contrastar los datos obtenidos por el dron con los datos registrados en tierra mediante un espectrómetro foliar y una prueba de Tukey ($p = 0,05$), se evidenciaron diferencias significativas entre los métodos de evaluación.

Palabras clave: agricultura de precisión, café, imágenes multiespectrales, NDVI, sistemas de información geográfica

Processing multispectral imaging captured by drones to evaluate the normalized difference vegetation index of Castillo coffee plantations

Abstract

Coffee is an important product in the Colombian economy, contributing mainly to the income of growers in Cauca, especially those seeking to increase profitability through differentiated cultivation processes and value-added crops. The current agronomic management is traditional and at random, limiting the general view of lot condition. Precision agriculture is a tool that makes crop management more reliable by taking into account its agroclimatic characteristics. The present study shows how the plants' nutritional status can be determined at an early stage using drone-borne multispectral imaging of the land. We obtained an information system to process images through an algorithm that calculates the normalized difference vegetation index (NDVI) in Castillo coffee growing. NDVI values higher than 0.8 were reached. When contrasting the data obtained by the drone with the data recorded on the ground using a leaf spectrometer with a Tukey test ($p = 0.05$), we found significant differences between the evaluation methods.

Keywords: coffee, geographical information systems, multispectral imaging, NDVI, precision agriculture

Introducción

El café variedad Castillo es un desarrollo del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) que ha sido comercializado desde 2005 y es producto del cruzamiento entre las variedades Caturra e Híbrido de Timor. Tiene características de buena calidad en taza, porte bajo, alta productividad y, principalmente, alta resistencia a la roya (Cortina et al., 2012; Sadeghian, 2017). Sin embargo, el éxito del cultivo de café depende de las condiciones del clima y de los procesos agronómicos, que influyen altamente en la calidad y el costo de la producción. En el manejo del cultivo, la fertilización determina el estado sanitario al proveer macro- y micronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo del café (Holguín, 2018). En este proceso, el nitrógeno es el directo responsable de la generación de clorofila (Pérez-Urria, 2015) y permite la identificación multispectral del vigor y el estado nutricional y sanitario de la planta.

En el método tradicional, las deficiencias de nitrógeno se evidencian a partir de la decoloración en las hojas (Sadeghian et al., 2014), pero esta característica visual aparece de forma tardía y genera altos costos correctivos. Los índices de vegetación, por su parte, permiten identificar de manera temprana la huella multispectral del nitrógeno a partir de la reflectancia de la clorofila desde datos del infrarrojo (Díaz García-Cervigón, 2015). No obstante, estos datos se obtienen de manera individual tomando muestras al azar en el cultivo de café con equipos de campo o de laboratorio, que son de alto costo y no evidencian el estado general del lote.

Como herramientas para la agricultura de precisión, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) o drones permiten transportar cámaras o sensores que capturan imágenes para optimizar el manejo de la variabilidad espacial y temporal del cultivo y sus factores de producción. El uso de las cámaras multispectrales ayuda a identificar, entre otros elementos, las huellas del nitrógeno y, por tanto, el vigor de las plantas (Planas, 2019). Al momento, la morfología del café constituye un reto para la implementación de esta tecnología, dada la distribución sobrepuesta de las hojas en la planta.

El nitrógeno se evalúa por medio de índices de vegetación; entre los cuales el más usado es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por su sigla en inglés), que evalúa la fluctuación del infrarrojo y el infrarrojo cercano con valores entre -1 y 1 (Díaz García-Cervigón, 2015). Este índice realiza la vegetación en función de la respuesta espectral y la separa de la huella emitida por el suelo, el agua, la iluminación, etc.

Esta investigación buscó evidenciar el procesamiento de imágenes capturadas por una cámara multispectral ubicada en un dron para analizar los colores degradados que responden al comportamiento fotosintético de la plantación del café.

Materiales y métodos

Dron y cámara

La plantación de café se observó mediante una aeronave DJI Phantom 4 pilotada a distancia, que realizó vuelos programados sobre el lote de este a oeste para fotografiar el cultivo con una cámara multiespectral y reducir el efecto de la pendiente sobre la imagen (García, 2017; González et al., 2016; Vera, 2017).

Las imágenes se tomaron con la cámara multiespectral MicaSense RedEdge™ 3 de nivel profesional, que tiene la capacidad de capturar simultáneamente cinco bandas espectrales: azul, verde, roja, *red edge* e infrarrojo cercano. La tabla 1 muestra las especificaciones de longitud de onda y ancho de cada banda. La información de las bandas es distinta debido a que cada espectro de luz expone datos que provienen de estados heterogéneos de las plantas o el entorno, lo cual genera una imagen multiespectral que registra información cuantitativa precisa sobre el vigor del cultivo (MicaSense, Inc., 2015; Quak, 2016; Vera, 2017).

Tabla 1. Especificaciones de la cámara multiespectral MicaSense RedEdge™ 3

N.º de banda	Nombre de banda	Centro de longitud de onda (nm)	Ancho de banda FWHM (nm)
1	Azul	475	20
2	Verde	560	20
3	Rojo	668	10
4	Infrarrojo cercano	840	40
5	<i>Red edge</i>	717	10

Fuente: Elaboración con base en MicaSense, Inc. (2015)

Para unir la cámara multiespectral al dron, se diseñó un anclaje de manera que esta no obstruyera las funciones de vuelo del vehículo. Este anclaje se creó mediante una impresora 3D que pertenece a la Corporación Universitaria Comfacauca.

Sistema de posicionamiento global (GPS)

Para el procesamiento de imágenes y la elaboración de ortomosaicos, se utilizó un GPS eTrex Vista® CX y puntos guía en las parcelas, que permiten la ubicación geográfica de los lotes en el cultivo, las subparcelas y las plantas de café, como anclaje para correlacionar con los datos del NDVI en vuelo y en tierra. Luego, se cosieron las imágenes en el sistema de información para generar los ortomosaicos (Bongiovanni et al., 2006; Ibarra, 2012).

Sistema de información

Se diseñó un sistema de información para el preprocesamiento de las imágenes obtenidas por la cámara multispectral del dron. Se calibraron, alinearon y cosieron las imágenes a fin de crear un ortomosaico, que es el insumo para calcular los índices de vegetación por cada pixel de la imagen. Así, se obtuvo la georreferencia por pixel y la información del NDVI, el índice de vegetación de relación simple (SR) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI).

Método de evaluación NDVI en las parcelas

El estudio fue realizado en el Parque Tecnológico de Innovación del Café y la Caficultura (Tecnicafé), ubicado en el corregimiento de La Venta, municipio de Cajibío, departamento de Cauca (figura 1), a 13 km de la ciudad de Popayán sobre la vía Panamericana Popayán - Cali (Colombia).

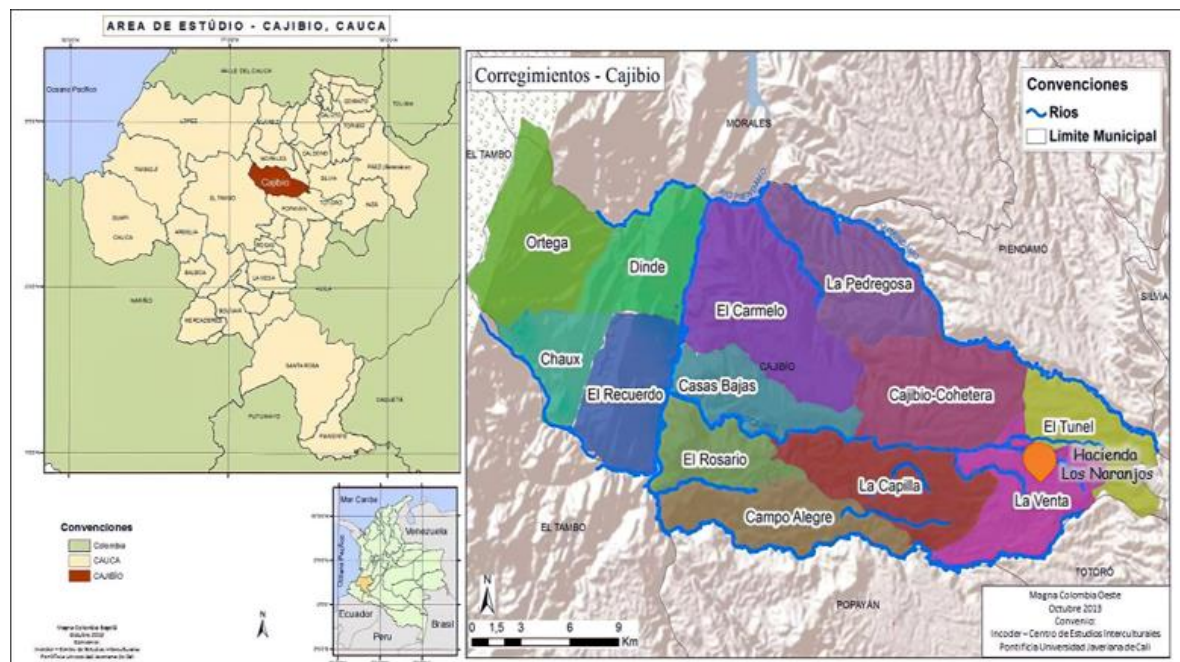


Figura 1. Ubicación del Parque Tecnológico de Innovación del Café y la Caficultura, en la hacienda Los Naranjos.

Fuente: Adaptada de La Rota y Salcedo (2013)

La estación de validación de la hacienda Los Naranjos, propiedad de Supracafé en el denominado Lote 3 (Supracafé, 2015), presenta un cultivo de café variedad Castillo de exposición directa, el cual se subdividió en tres parcelas para realizar los procedimientos que se describen a continuación.

Adecuación del cultivo de café

El Lote 3 de la hacienda Los Naranjos se subdividió como se muestra en la figura 2. Se realizó una distribución de sur a norte de tres subparcelas con diferentes condiciones de fertilización del suelo: la parcela 1 contenía un superávit de nitrógeno superior a 20 mg/m² en el suelo; la parcela 2 presentaba un nivel óptimo de nitrógeno con 15 mg/m², y la parcela 3 poseía un déficit de nitrógeno con menos de 10 mg/m². En estas parcelas, se establecieron 12 puntos de anclaje para guiar los vuelos. En total, cada parcela tenía 285 plantas de café variedad Castillo en etapa productiva con siembra a exposición directa y densidad de siembra de 3,5 plantas/m².



Figura 2. Distribución del lote de cultivo para el experimento.

Fuente: Elaboración propia

Los vuelos sobre el cultivo fueron programados una vez a la semana en cenit durante los seis meses de la etapa productiva del lote (floración a cosecha). Los vuelos se hicieron en zigzag, de este a oeste (arriba y abajo) y a una altura de 25 m para reducir la incidencia de la pendiente en la reflectancia de la luz. Se tomaron aproximadamente 600 imágenes por vuelo con la información georreferenciada y resolución de 1.280 × 960 píxeles (González et al., 2016; López, 2014).

Procesamiento de ortomosaicos y cálculo de NDVI

Las imágenes fueron procesadas por un *software* desarrollado en Matlab y denominado Sistema de Información de Procesamiento de Imágenes y Visualización de NDVI Georreferenciado, que hace un balance del color y corrige la distorsión geométrica con una resolución espacial promedio de 10.200×1.320 píxeles para crear un mosaico continuo de todo el cultivo manteniendo las propiedades de la imagen. Las fotografías se procesaron a fin de reducir la incidencia de la exposición solar y la intensidad de los niveles de luz en el entorno, para lo cual se requirió: a) calibración radiométrica, b) calibración de la imagen, c) calibración geométrica y d) alineación de las imágenes. De esta forma, se redujo el margen de error que existe entre las bandas (Marcovecchio et al., 2014) y se generaron dos ortomosaicos del espectro electromagnético (figura 3).

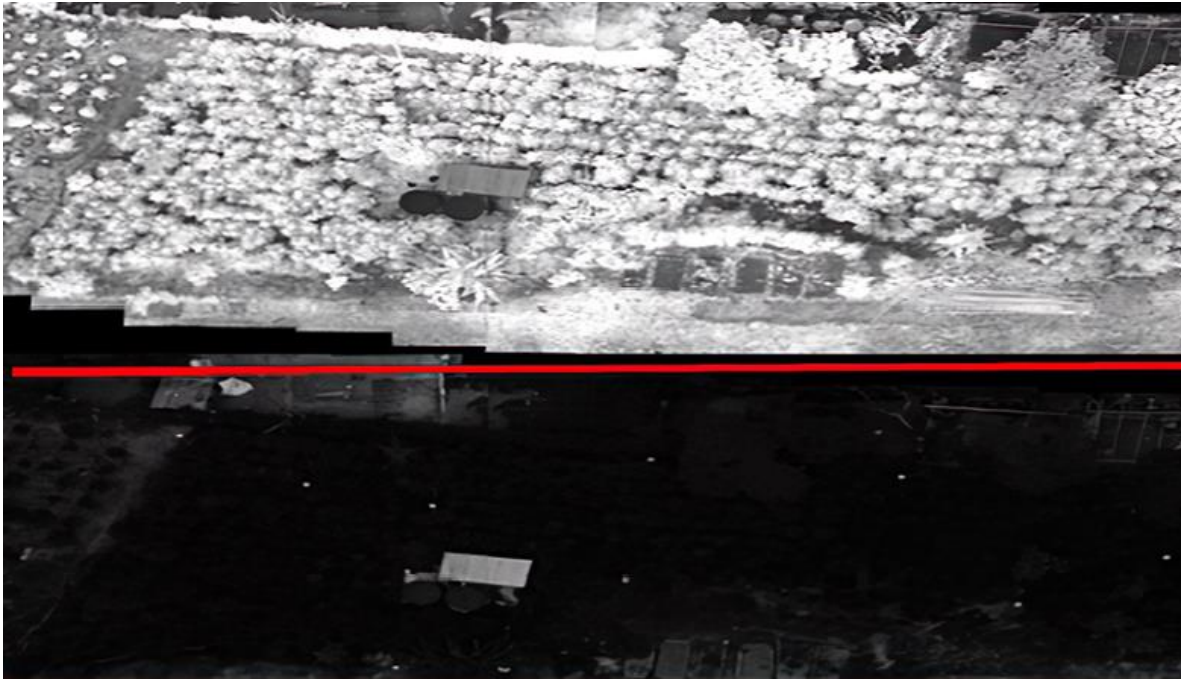


Figura 3. Distribución del lote de cultivo para el experimento. En la parte superior se encuentra la banda del infrarrojo cercano (NIR) y en la parte inferior, la banda del rojo.

Fuente: Elaboración propia

Después, se combinaron las bandas del espectro visible y la infrarroja provenientes de la cámara multispectral. Para lograr esta combinación, se realizó una operación matemática entre las bandas cuyo resultado permite representar en forma gráfica algunas características de la planta como el vigor y el estrés hídrico. Para calcular el NDVI se utilizó la ecuación 1 (Castro, 2013; Díaz García-Cervigón, 2015):

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR}-\text{ROJO})}{(\text{NIR}+\text{ROJO})} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde NIR simboliza los valores del pixel de la banda infrarroja y ROJO representa los valores por pixel de la banda roja en los cálculos aritméticos por pixel. El *software* mantiene la georreferencia por pixel al tomar como referencia el geoposicionamiento de los puntos de anclaje, lo que permite la visualización del NDVI y la georreferencia de la imagen en cualquier punto del cultivo (figura 4).

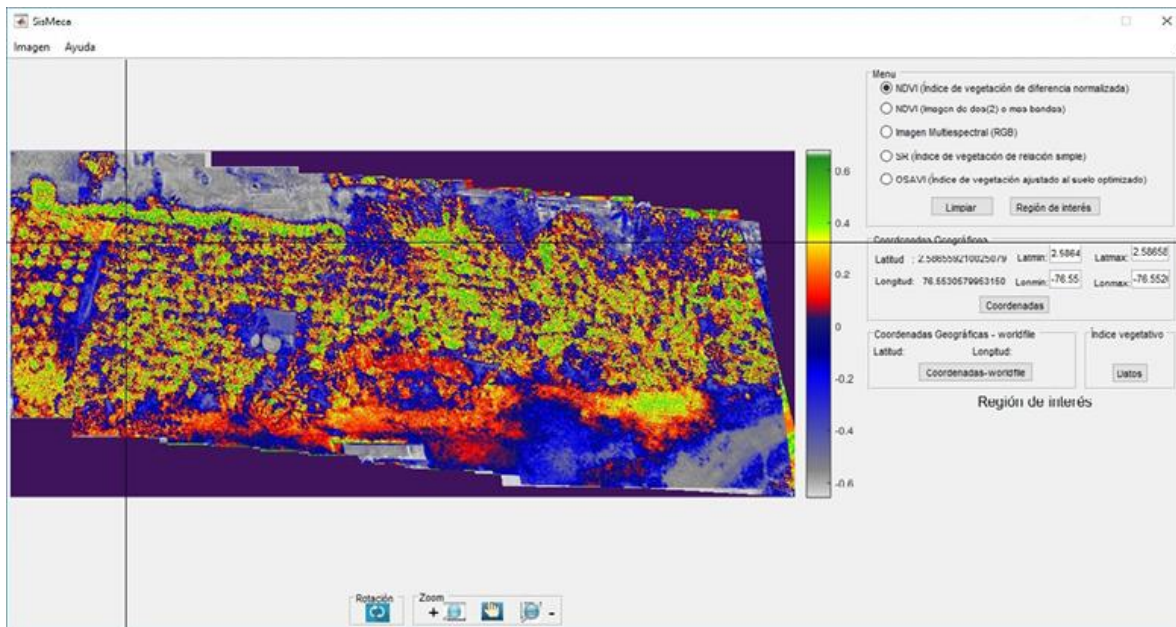


Figura 4. Sistema de información de procesamiento de imágenes y cálculo de NDVI.

Fuente: Elaboración propia

Seguimiento en tierra para validación del sistema

Para evaluar los cálculos obtenidos por el sistema de información, se realizó un seguimiento en tierra del NDVI de las plantas en las subparcelas mediante un espectrómetro foliar. Se seleccionaron las plantas a muestrear en tierra con el método Cinco de Oros (Montoya-Bonilla et al., 2017), de manera que se tomaron los cuatro bordes y el centro de cada parcela (figura 5). Así, se completaron 19 grupos de cinco plantas cada uno para un total de 95 plantas por subparcela, que representa un 33 % del lote total a fin de mantener la uniformidad del estudio.

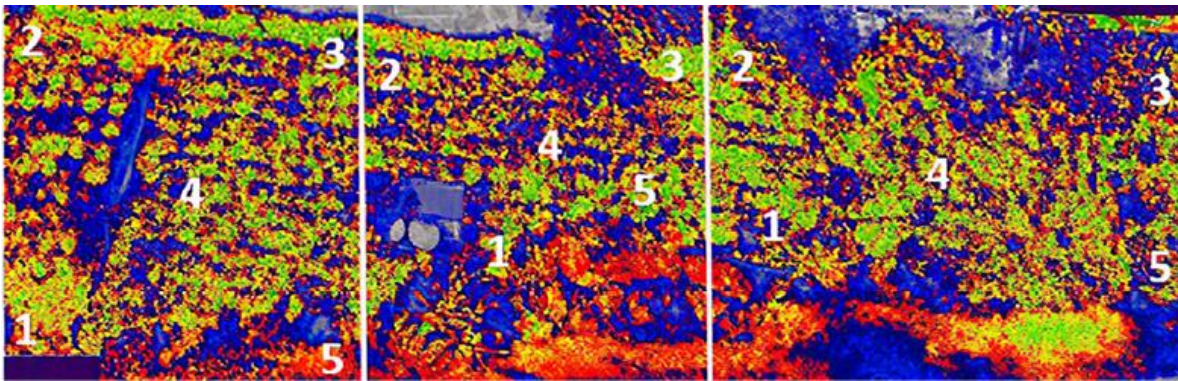


Figura 5. Distribución del muestreo según el método Cinco de Oros para datos en tierra y en aire.

Fuente: Elaboración propia

A las plantas seleccionadas se les evaluó el NDVI con el espectrómetro foliar GreenSeeker Handheld, un sensor portátil que permite medir el vigor del cultivo en tierra mediante un haz de luz que se refracta sobre los 30 cm y 500 cm por encima de la planta (Botero, 2009; Del Valle et al., 2015). En el análisis comparativo de los datos recolectados en tierra y aire, la prueba de Tukey arrojó un rango de error del 5 %, sin diferencias significativas en las medidas de los índices entre las parcelas y los datos en tierra y en aire.

Resultados y discusión

Correlación de los datos del NDVI

Con el fin de verificar que los datos del NDVI obtenidos mediante el *software* fueran representativos (datos en aire), se midió el NDVI del cultivo en tierra (datos en tierra) con el espectrómetro foliar. Los datos obtenidos se clasificaron en dos periodos de tiempo: los meses de floración (M1) y los meses de fructificación (M2), tanto en vuelo (M1V, M2V) como en tierra (M1T, M2T) (tabla 2).

Tabla 2. Promedios del NDVI en tierra y en vuelo

Parcela	Punto	M1T	M1V	M2T	M2V
1	1	0,88	0,93	0,88	0,92
	2	0,88	0,93	0,89	0,93
	3	0,88	0,93	0,88	0,93
	4	0,86	0,9	0,87	0,92
	5	0,88	0,92	0,89	0,93
2	1	0,85	0,92	0,87	0,92
	2	0,86	0,91	0,88	0,92
	3	0,86	0,9	0,88	0,91
	4	0,85	0,89	0,87	0,91
	5	0,86	0,92	0,87	0,91
3	1	0,84	0,91	0,85	0,92
	2	0,85	0,89	0,86	0,91
	3	0,84	0,89	0,85	0,92
	4	0,84	0,88	0,84	0,9
	5	0,85	0,93	0,86	0,92

Fuente: Elaboración propia

La comparación de los resultados permite evidenciar que los datos en tierra registran un vigor cercano a 0,85, lo que representa un buen estado nutricional de las plantas en los dos periodos fenológicos (Meneses-Tovar, 2011). Por su parte, los datos en vuelo mantienen el comportamiento espacio-temporal, aunque reportan un mayor índice de vigor con un NDVI promedio de 0,93 (figura 6).

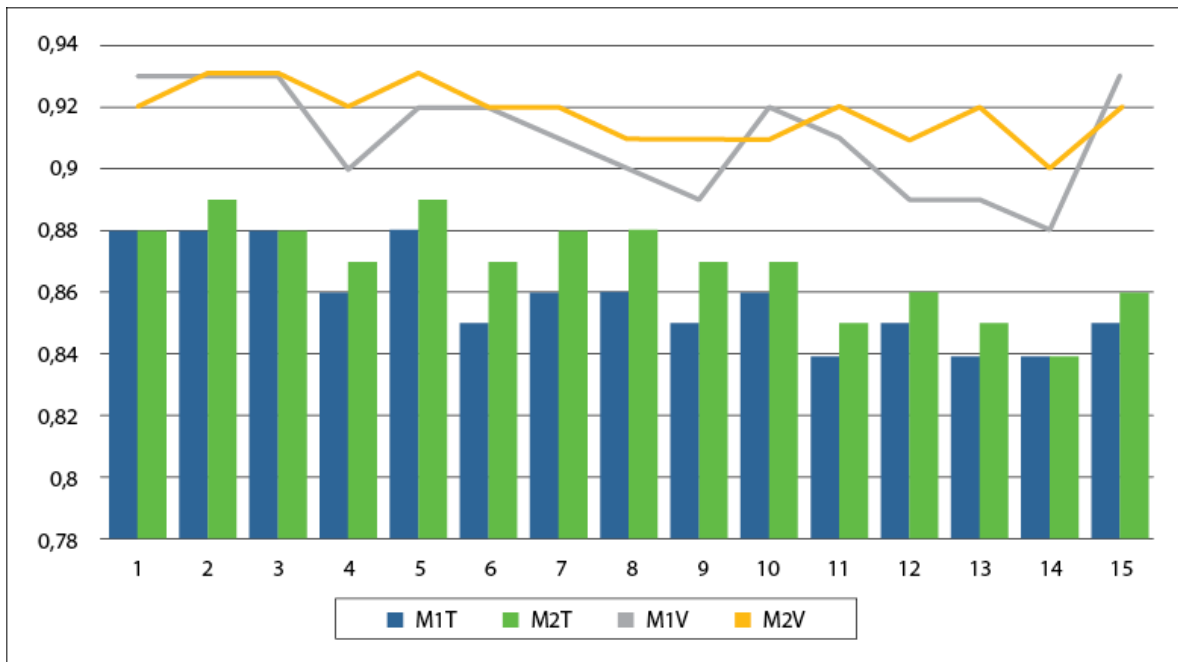


Figura 6. Datos de vigor en tierra y en vuelo durante los dos periodos estudiados.

Fuente: Elaboración propia

La prueba de Tukey señaló un 5 % de significancia (García-Villalpando et al., 2001; Silva & De Azevedo, 2016), lo que evidenció que las parcelas no presentaron diferencias espacio-temporales significativas entre ellas, ni por la diferencia nutricional en el suelo con las variaciones en la concentración de nitrógeno ni con la temporalidad representada por los estados fenológicos (floración y fructificación). Aunque se observaron concentraciones diferentes de nitrógeno en el suelo, esta variación no se reflejó al medir el índice NDVI con ninguno de los métodos, ya que se evaluó la reflectancia de las hojas y el vigor en el estado adulto de las plantas no resultó afectado (tabla 3).

Tabla 3. Promedio del NDVI en tierra y en vuelo

	Parcela 1	SEM	Parcela 2	SEM	Parcela 3	SEM
M1T	0,88	2,7E-03 A	0,86	3,2E-03 A	0,84	4,2E-03 A
M2T	0,88	2,7E-03 A	0,87	3,2E-03 A	0,85	4,2E-03 A
M1V	0,92	2,7E-03 B	0,91	3,2E-03 B	0,90	4,2E-03 B
M2V	0,92	2,7E-03 B	0,91	3,2E-03 B	0,91	4,2E-03 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

Los datos tomados por el dron, al igual que los datos recolectados en tierra, no mostraron diferencias significativas entre las parcelas y los vuelos realizados. Sin embargo, se presentaron diferencias entre los métodos de muestreo en tierra y en vuelo. Esto probablemente se debe al incremento de las unidades de reflectividad emitidas por el suelo y la variación en la distancia de las plantas respecto al espectrómetro y al dron (Muñoz, 2013). Para reducir estos errores, es importante mantener la uniformidad en el método y la hora de muestreo, y ubicar la cámara de forma correcta para que la vegetación circundante no genere alteraciones en la cantidad de luz.

La presencia de diferentes coberturas vegetales en el área del cultivo incrementa la reflectancia dentro de los píxeles, lo que genera una percepción de mayor vigor en la imagen multiespectral tomada por el dron (Aristizábal, 2017). Asimismo, la diferencia en la pendiente de la línea de suelo influye en la reflectancia de la banda roja y del infrarrojo cercano. Estos factores se deben tener en cuenta al momento de capturar las imágenes con la cámara multiespectral para reducir las variaciones en las mediciones (Castro, 2013).

Conclusiones

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) o drones son una herramienta útil para optimizar los procesos de agricultura de precisión, pues brindan información real de las áreas de cultivo y reducen el tiempo y el esfuerzo necesarios para su monitoreo. Las imágenes multiespectrales evidenciaron huellas espectrales de distintas características del cultivo, incluyendo su vigor y el estado vegetativo de las plantas.

El uso de sensores multiespectrales permitió el análisis del NDVI y el tratamiento de los datos en el sistema de información posibilitó el cálculo del SR y el SAVI. Asimismo, se analizó el vigor del cultivo con base en la reflectancia del infrarrojo, al examinar no solo las plantas, sino también las condiciones del terreno y el entorno.

Las etapas de floración y fructificación del café variedad Castillo en cultivos a exposición directa no evidenciaron diferencias en el índice NDVI. Las diferencias significativas entre los métodos de muestreo reflejan la necesidad de realizar nuevos estudios o procesamientos complementarios que excluyan errores de reflectancia dados por las características del suelo, la pendiente y la cobertura vegetal asociada a los cultivos.

El desarrollo del *software* en Matlab para procesar las imágenes permitió realizar el cálculo del NDVI y obtener la georreferencia; sin embargo, se recomienda realizar más calibraciones hasta obtener mejores resultados. El procesamiento de las imágenes multiespectrales evidenció una gran cantidad de datos relacionados con los factores externos que afectan la plantación del café. El sistema de información desarrollado en el estudio facilita el tratamiento de estos datos y genera una visualización para su análisis. En general, el uso de sistemas de información a partir de imágenes multiespectrales y procesos de geolocalización permite establecer un proceso productivo más eficiente enfocado en la detección temprana de problemáticas fitosanitarias.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Parque Tecnológico de Innovación del Café y la Caficultura (Tecnicafé), la Asociación de Mujeres Caficultoras del Cauca (AMUCC), la Gobernación del Cauca, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Supracafé, Multiscan Technologies, Coffee Quality Institute y Specialty Coffee Association. También agradecen a la Red de Formación del Talento Humano para la Innovación Social y Productiva en el Departamento del Cauca (InnovAcción Cauca), por la financiación del proyecto en el marco del Convenio 6-81.2/015 de 2018, y a la Corporación Universitaria Comfacaucá, por todo su apoyo en la ejecución del proyecto.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Aristizábal, J. (2017). *Comparación de la respuesta de diferentes índices de vegetación del frailejón a partir de diferentes metodologías (índices) como indicador indirecto del estado de conservación del humedal* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Manizales]. Repositorio UCM. <http://hdl.handle.net/10839/1928>
- Bongiovanni, R., Chartuni, E., Best, S., & Roel, Á. (Eds.). (2006). *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <http://www.procisur.org.uy/adjuntos/135050.pdf>
- Botero, J. M. (2009). *Determinación del nivel foliar de nutrientes mediante espectroscopia de reflectancia* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín]. Repositorio Institucional UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2422>
- Castro, D. R. (2013). Monitoreo de bosques utilizando NDVI RedEdge de RapidEye. *Revista Geoespacial*, 10, 58-71. <http://geoespacial.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2017/01/Geoespacial10.pdf>
- Cortina, G. H., Moncada, B. M., & Herrera, P. J. (2012). Variedad Castillo. Preguntas frecuentes. *Avances Técnicos Cenicafé*, 426. [http:// https://www.cenicafe.org/es/publications/avt04261.pdf](http://https://www.cenicafe.org/es/publications/avt04261.pdf)
- Del Valle, G., Muciño, D., Cruz, R. & Gallardo, G. (2015). *Funcionamiento de los espectrómetros* [conferencia]. XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia. Centro de Investigaciones en Óptica, León, México. https://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion1/S1-DIV03.pdf
- Díaz García-Cervigón, J. J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión* [Tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid]. E-Prints Complutense. <https://eprints.ucm.es/31423/>

- García, L. (2017). *Drones, el cielo está al alcance de todos*. Consorci d'Educació Barcelona, IES Emperador Carles. https://www.edubcn.cat/rcs_gene/treballs_recerca/2015-2016-03-1-TR.pdf
- García-Villalpando, J. A., Castillo-Morales, A., Ramírez-Guzmán, M. E., Rendón-Sánchez, G., & Larqué-Saavedra, M. U. (2001). Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, Hsu y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia*, 35(1), 79-86. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/92/92>
- González, A., Amarillo, G., Amarillo, M. & Sarmiento, F. (2016). Drones aplicados a la agricultura de precisión. *Publicaciones e Investigación*, 10, 23-37. <https://doi.org/10.22490/25394088.1585>
- Holguín, G. (2018). *Comportamiento morfológico del café (Coffea arabica L.) sarchimor 4260 en etapa de crecimiento con fertilizantes químicos y orgánicos* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Repositorio Digital UNESUM. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1999>
- Ibarra, L. (2012). *Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos con sensores: 808h5v5, Mcp9700a, Watermark, Mpx4115a, Sq-110, comunicación mediante protocolo Zigbee y Mysql, para un cultivo de tomate en Sutamarchán, Boyacá (Colombia)* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional USTA. <http://repositorio.usta.edu.co/handle/11634/2288>
- La Rota, M. J., & Salcedo, L. H. (2013). *Análisis de estructura de la propiedad en el municipio de Cajibío (Cauca)*. Incoder; Centro de Estudios Interculturales, Pontificia Universidad Javeriana Cali. <https://bit.ly/30Zu9FR>
- López, A. (2014). *Planificación de vuelos fotogramétricos para U. A. V. sobre cliente QGIS*. [Tesis de maestría, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/28481>
- Marcovecchio, D., Costa, L., & Delrieux, C. (2014). *Ortomosaicos utilizando imágenes aéreas tomadas por drones y su aplicación en la agricultura de precisión*. 13º Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Manfredi.
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyva*, 238(62), 39-46. <http://www.fao.org/3/i2560s/i2560s07.pdf>
- MicaSense, Inc. (2015). *MicaSense RedEdge™ 3 Multispectral Camera. User Manual*. Rev 06. <https://bit.ly/314xqUz>
- Montoya-Bonilla, B. P., Baca-Gamboa, A. E., & Bonilla, B. L. (2017). Flora melífera y su oferta de recursos en cinco veredas del municipio de Piendamó, Cauca. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15(1), 20-28. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(15\)20-28](https://doi.org/10.18684/BSAA(15)20-28)
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de teledetección: índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26389>
- Pérez-Urria, E. (2015). Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología)*, 2(3), 1-47. <http://www.revistareduca.es/index.php/biologia/article/view/793/809>
- Planas, S. (2019). Agricultura de precisión y protección de cultivos. *Revista de Ingeniería*, 47, 10-19. <http://dx.doi.org/10.16924/%2Fria.v0i47.985>
- Quak, E-J. (Ed.). (2016). *Drones for agriculture*. *ICT Update*, 82. Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation ACP-EU. http://ictupdate.cta.int/cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/89779/ICT082E_PDF.pdf

- Sadeghian, K. (2017). Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en café. *Avances Técnicos Cenicafe*, 478. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0478.pdf>
- Sadeghian, K. S., Mejía, M. B., & González, O. H. (2014). Acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en los frutos de café (*Coffea arabica* L.). *Cenicafé*, 63(1), 7-18. <http://hdl.handle.net/10778/519>
- Silva, F. A., & De Azevedo, C. A. (2016). Comparison of means of agricultural experimentation data through different tests using the software Assisat. *African Journal of Agricultural Research*, 11(37), 3527-3531. <https://doi.org/10.5897/ajar2016.11523>
- Supracafé. (2015, junio 10). *Supracafé lidera la constitución del primer parque tecnológico del café en Colombia*. <https://bit.ly/2SRtnGB>
- Vera, D. (Dir.). (2017). *Desarrollo de un algoritmo que determine índices normalizados de vegetación (ENDVI) utilizando cartografía aérea por medio de drones (UAV) para el seguimiento fenológico del cultivo de café* [Proyecto de investigación, convocatoria Proyectos Conjuntos UEES - I+D]. Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes, Corporación Universitaria Comfacaucá.