



VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) PARA EL MONITOREO AGRONÓMICO DE CULTIVO DE MANÍ.

Cristhian Martín Delgado Marcillo
Maestría en Geomática. Facultad de Posgrado. Universidad Técnica de Manabí - UTM

cristhian.delgado@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-7248-6718>

Ezequiel Zamora-Ledezma
Laboratorio de Agroecosistemas y Cambio Climático, Departamento de Ciencias Agrícolas, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica de Manabí - UTM

ezequiel.zamora@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-5315-2708>

Henry Antonio Pacheco Gil
Departamento de Ciencias Agrícolas, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica de Manabí - UTM

henry.pacheco@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9997-9591>

[Autor para correspondencia: ezequiel.zamora@utm.edu.ec](mailto:ezequiel.zamora@utm.edu.ec)

Recibido: 05/04/2025

Aceptado: 07/05/2025

Publicado: 07/07/2025

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo monitorear las condiciones agronómicas del cultivo de maní (*Arachis hypogaea*) mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) equipados con cámara RGB, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de recursos agrícolas. Se evaluaron cinco índices espectrales (GLI, SAVI, RGBVI, MGRVI y Vlgreen) en una parcela experimental de 7.000 m², utilizando un diseño factorial que incluyó cuatro variedades de maní, dos densidades de siembra y dos tipos de labranza. Los datos fueron capturados con un dron DJI Phantom 4 Pro y procesados con software fotogramétrico y herramientas de análisis espacial. Los resultados mostraron que el índice RGBVI presentó los valores más altos de reflectancia ($0,52 \pm 0,05$), siendo el más efectivo para evaluar la vigorosidad del cultivo. Las variedades INIAP-381 e INIAP-383 mostraron mayor vigor, mientras que la labranza convencional favoreció el desarrollo del cultivo en comparación con la labranza cero. La interacción entre la variedad INIAP-381 y la densidad de siembra de 62.500 plantas/hectárea



resultó con una mayor reflectancia, indicando un mejor aprovechamiento de los recursos nutricionales. Estos hallazgos sugieren que el uso de VANT equipados con sensores RGB y el índice espectral RGBVI pueden ser herramientas accesibles y eficaces para el monitoreo de cultivos de maní, reduciendo costos y facilitando la toma de decisiones en la agricultura de precisión. La aplicación de estas tecnologías puede contribuir a la formulación de políticas públicas orientadas a revitalizar el sector manicero en Ecuador, fortaleciendo la cadena de valor incrementando la productividad.

Palabras clave: Agricultura de precisión, índices espectrales, vigorosidad de cultivos, análisis espacial, tecnología agrícola.

ABSTRACT

This study aimed to monitor the agronomic conditions of peanut (*Arachis hypogaea*) crops using unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with RGB cameras to improve the efficiency of agricultural resource use. Five spectral indices (GLI, SAVI, RGBVI, MGRVI, and Vlgreen) were evaluated in a 7,000 m² experimental plot, using a factorial design that included four peanut varieties, two planting densities, and two types of tillage. Data were captured with a DJI Phantom 4 Pro drone and processed using photogrammetric software and spatial analysis tools. The results showed that the RGBVI index had the highest reflectance values (0.52 ± 0.05), making it the most effective for evaluating crop vigor. The INIAP-381 and INIAP-383 varieties demonstrated higher vigor, while conventional tillage favored crop development compared to zero tillage. The interaction between the INIAP-381 variety and a planting density of 62.500 plants/hectare resulted in higher reflectance, indicating better resource utilization. These findings suggest that UAVs equipped with RGB sensors and the RGBVI spectral index can be accessible and effective tools for peanut crop monitoring, reducing costs and facilitating decision-making in precision agriculture. The application of these technologies can contribute to public policy formulation aimed at revitalizing the peanut sector in Ecuador, strengthening the value chain and increasing productivity.

Keywords: Precision agriculture, spectral indices, crop vigor, spatial analysis, agricultural technology.

INTRODUCTION

La rápida urbanización global representa un desafío significativo para los sistemas agroalimentarios. En 2018, el 55 % de la población mundial residía en áreas urbanas, y se proyecta que esta cifra aumente al 68 % para 2050 (Al-Qubati et al.,



2024). Este crecimiento urbano y demográfico impulsa una mayor demanda de alimentos, la cual se estima que incrementará entre un 35 % y un 56 % para mediados de este siglo (Al-Qubati et al., 2024). Paralelamente, la variabilidad climática y la creciente presión sobre los recursos hídricos verdes y azules están llevando los sistemas agroalimentarios al límite de la sostenibilidad. Esto exige maximizar la productividad de dichos recursos mediante métodos y prácticas sostenibles que aseguren la producción alimentaria sin comprometer el medio ambiente. Además, la pérdida de biodiversidad y la degradación de los ecosistemas, impulsadas principalmente por el cambio en el uso de la tierra y la intensificación agrícola, constituyen amenazas significativas para el bienestar humano, subrayando la necesidad de enfoques integrados que equilibren la producción y la conservación (López Rodríguez et al., 2024).

El uso de drones como plataforma de teledetección se plantea como una alternativa eficaz para la gestión, supervisión y regulación de los cultivos agrícolas en diferentes etapas de su ciclo de crecimiento, con el propósito de potenciar la productividad y disminuir los costos (Ingole et al., 2024). Los vehículos aéreos no tripulados se utilizan en la agricultura para el monitoreo de cultivos, ya que es posible utilizar cámaras infrarrojas y de color para detectar la aparición de enfermedades a través de cambios en el color de los cultivos (Zhang et al., 2025).

En este contexto, la agricultura de precisión (AP) valora la teledetección como una herramienta clave para el monitoreo de cultivos. El uso de imágenes de distintas longitudes de onda y el análisis de índices de vegetación, los drones pueden evaluar las condiciones de los cultivos con precisión, permitiendo ajustes rápidos en las prácticas agronómicas (Qu et al., 2024). Esta tecnología contribuye a mejorar la salud del suelo, preservar la calidad del agua y



fomentar el crecimiento económico local, promoviendo una agricultura más eficiente y sostenible (Marin et al., 2024).

El maní (*Arachis hypogaea*.) es el sexto cultivo oleaginoso más cultivado del mundo, con un valor significativo en términos de seguridad nutricional debido a su contenido de grasas, proteínas, minerales y vitaminas (FAO, 2018). El rendimiento del maní está influenciado por diversos factores, entre los que destacan el diseño agronómico del cultivo, la preparación del terreno, la densidad de siembra, el riego y la fertilización (Moreira et al., 2024). Como parte de la familia de las leguminosas, el maní tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico y donarlo al suelo, lo que reduce la necesidad de fertilizantes nitrogenados (Cedeño Vélez, 2023). La potencialidad como bio-fábrica de nitrógeno que exhibe el maní, aunado al hecho de que, en el Ecuador, y especialmente en provincias como Manabí y Loja, donde el rubro representa un segmento importante del aparato agro productivo (Zamora-Ledezma, 2024) con una demanda de mercado significativa en función de la dieta rica en maní y sus derivados, constituye una amplia justificación para realizar estudios de esta naturaleza.

En la agricultura, es importante contar con una estimación de cosecha rápida, precisa y económica debido a sus implicaciones logísticas, técnicas y económicas, para reducir las pérdidas al mínimo (Cedeño Vélez, 2023). En este sentido, el monitoreo del cultivo, mediante índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes espectrales, ofrece la oportunidad de adoptar nuevos enfoques y herramientas para el seguimiento fenológico y la estimación de cosechas en sistemas agrícolas (Shojaeezadeh et al., 2024). Asimismo, el uso de drones equipados con cámaras RGB ha demostrado ser efectivo en la estimación del rendimiento de la caña de azúcar y otros rubros de interés nacional, al mapear atributos de los cultivos como la altura de la planta y la

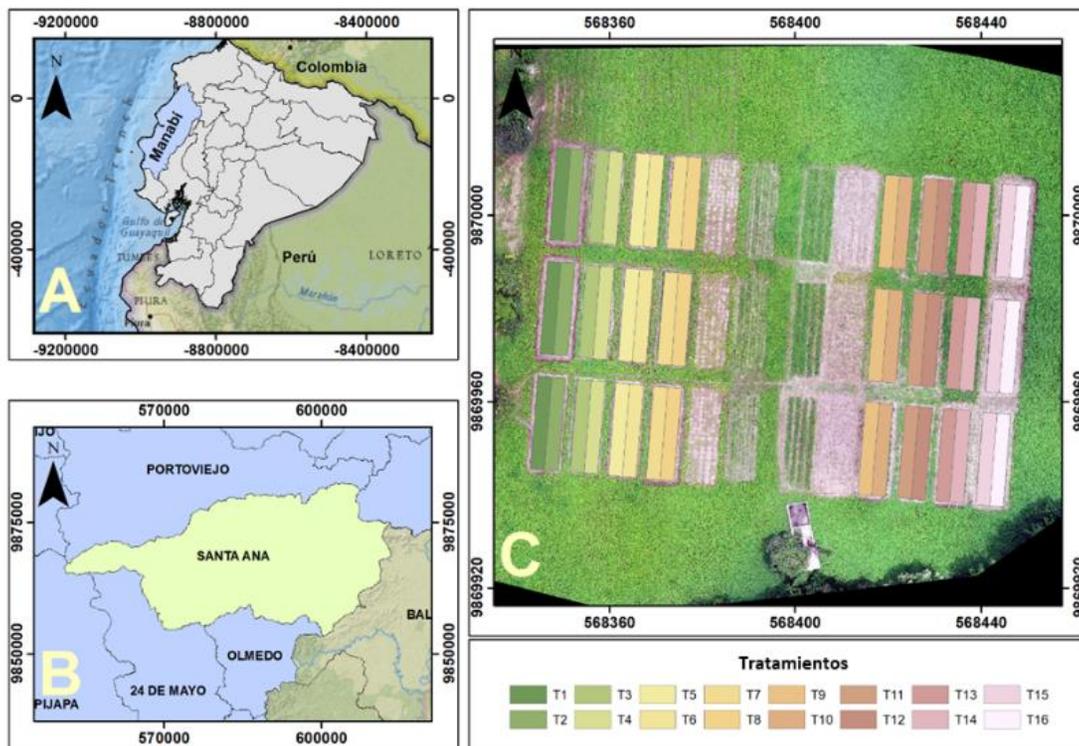
densidad del tallo con alta precisión, facilitando la planificación de labores agrícolas como la cosecha y la molienda (Sumesh et al., 2021).

Con base a los antecedentes expuestos, la finalidad del presente estudio es monitorear las condiciones agronómicas del cultivo de maní mediante el uso de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) como técnica de teledetección, para optimizar el uso de los recursos agrícolas.

METODOLOGÍA

Esta investigación se realizó en una parcela experimental de 7,000 m² establecida en los predios del campus Lodana de la Facultad de Ingeniería Agrícola, ubicada en el la parroquia Lodana cantón Santa Ana, provincia Manabí, Ecuador (Figura 1).

Figura 1. (A) Macro ubicación, Ecuador. (B) Meso ubicación, (C) Ubicación de las parcelas experimentales. Coordenadas proyectadas UTM (Universal Transversal Mercator), Zona 17Sur”.





Diseño experimental

La presente investigación tuvo un enfoque experimental y cuantitativo, empleando un diseño factorial $4 \times 2 \times 2$ (AxBxC) con tres factores principales, generando 16 tratamientos con tres repeticiones cada uno (Tabla 1).

El factor A correspondió a cuatro variedades de maní desarrolladas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP): INIAP-381, INIAP-383, INIAP-380 e INIAP-382. Estas variedades fueron seleccionadas debido a su relevancia agronómica y adaptabilidad a diversas condiciones de cultivo.

El factor B incluyó dos densidades de siembra: 62.500 plantas/hectárea (pl/ha) (densidad recomendada por el INIAP) y 100.000 pl/ha, establecidas para evaluar si una mayor densidad mejora las condiciones del cultivo en comparación con la densidad estándar. Este análisis permitió estudiar la respuesta de las plantas ante diferentes niveles de competencia intraespecífica.

El factor C evaluó dos tipos de labranza: labranza cero (L_0) que consistió en no aplicar ningún tipo de arado y labranza convencional (L_C) aplicando un arado de romplow con una capa arable de 15 cm de profundidad. Este componente se diseñó para analizar el efecto de las prácticas de manejo y mecanización del suelo en el desarrollo del cultivo de maní.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos

| Tratamientos | Factor A | Factor B | Factor C | Interacción |
|----------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|--|
| T ₁ | V ₁ : INIAP 381 ROSITA | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | | V ₁ M ₁ L ₀ |
| T ₂ | V ₁ : INIAP 381 ROSITA | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | | V ₁ M ₂ L ₀ |
| T ₃ | V ₂ : INIAP 383 Pintado | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | L ₀ : Labranza cero | V ₂ M ₁ L ₀ |
| T ₄ | V ₂ : INIAP 383 Pintado | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | | V ₂ M ₂ L ₀ |
| T ₅ | V ₃ : INIAP 380 Charapoto | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | | V ₃ M ₁ L ₀ |



| | | | |
|-----------------|--------------------------------------|---|--|
| T ₆ | V ₃ : INIAP 380 Charapoto | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | V ₃ M ₂ L ₀ |
| T ₇ | V ₄ : INIAP 382 Caramelo | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | V ₄ M ₁ L ₀ |
| T ₈ | V ₄ : INIAP 382 Caramelo | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | V ₄ M ₂ L ₀ |
| T ₉ | V ₄ : INIAP 382 Caramelo | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | V ₄ M ₁ L _c |
| T ₁₀ | V ₄ : INIAP 382 Caramelo | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | V ₄ M ₂ L _c |
| T ₁₁ | V ₃ : INIAP 380 Charapoto | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | V ₄ M ₁ L _c |
| T ₁₂ | V ₃ : INIAP 380 Charapoto | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | V ₄ M ₂ L _c |
| T ₁₃ | V ₂ : INIAP 383 Pintado | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | V ₄ M ₁ L _c |
| T ₁₄ | V ₂ : INIAP 383 Pintado | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | V ₄ M ₂ L _c |
| T ₁₅ | V ₁ : INIAP 381 ROSITA | D ₁ : 100.000 plantas/hectárea (0,2m x 0,5m) | V ₄ M ₁ L _c |
| T ₁₆ | V ₁ : INIAP 381 ROSITA | D ₂ : 62.500 plantas/hectárea (0,2m x 0,8m) | V ₄ M ₂ L _c |

L_c: Labranza convencional

Variables evaluadas

Para determinar el vigor del cultivo de maní, se analizaron cinco índices espectrales RGB (Tabla 2), seleccionados con base en el estudio de Lóránt et al., (2024).

Tabla 2. Índices de vegetación RGB. *R*: banda visible roja, *G*: banda visible verde y *B*: banda visible azul.

| Índice | Nombre | Fórmula | Referencia bibliográfica |
|--------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| GLI | Green Leaf Index | $\frac{2G - R - B}{2G + R + B}$ | (Ponce Conforme et al., 2024) |
| SAVI | Soil Adjusted Vegetation Index | $\frac{1,5 * (G - R)}{G + R + 0,5}$ | Lóránt et al., (2024) |



| | | | |
|---------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| RGBVI | Red Green Blue Vegetation Index | $\frac{G^2 - (B * R)}{G^2 + (B * R)}$ | Lóránt et al., (2024) |
| MGRVI | Modified Green Red Vegetation Index | $\frac{G^2 - R^2}{G^2 + R^2}$ | Pacheco y Montilla, (2020) |
| Vlgreen | Vegetation Index Green | $\frac{G - R}{G + R}$ | Pacheco y Montilla, (2020) |

Para monitorear la fenología del cultivo, se llevó a cabo una misión de vuelo con un VANT durante la etapa fenológica de mayor vigor del cultivo, a los 60 días después de la germinación. Para ello, se utilizó un VANT modelo DJI Phantom 4 Pro, equipado con una cámara RGB con un sensor CMOS de 1" y 20 Mpx de resolución. El plan de vuelo fue diseñado mediante el software DJI GS PRO, delimitando un polígono rectangular georreferenciado que abarcaba la totalidad de la zona de estudio. Los parámetros de vuelo fueron ajustados conforme a las recomendaciones establecidas por Anfruns España, (2023) (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros de vuelo (Anfruns España, 2023)

| Parámetro | Descripción |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Altura de vuelo (m) | 50 |
| Velocidad de vuelo (m/s) | 4 |
| Área de cobertura (m ²) | 10.000 |
| Tipo de sensor | CMOS de 1", 20 Mpx (RGB) |
| Solapamiento Lateral (%) | 70 |
| Solapamiento Frontal (%) | 80 |
| Inclinación del gimbal (°) | 90 |
| Hora de vuelo aproximada | 10 am - 11 am |

Las imágenes capturadas durante el vuelo fueron procesadas mediante un análisis fotogramétrico utilizando el software Pix4Dmapper, reconocido por su autonomía y eficiencia (Hernández-Cole et al., 2023). Este proceso permitió generar una ortofoto georreferenciada de la zona de estudio a partir de las bandas visibles (RGB) obtenidas en cada sesión de vuelo.



Para garantizar la precisión espacial de la ortofoto generada, se establecieron seis puntos de control georreferenciados mediante un equipo GNSS (Global Navigation Satellite System) de la marca TOPCON, modelo GR-5. Los datos se procesaron utilizando el método estático (IGM, 2016), lo que permitió registrar información con alta exactitud espacial en el procesamiento de las imágenes.

Finalmente, se calcularon los índices espectrales utilizando el software ArcGIS, específicamente el módulo ArcMap. Las bandas RGB (Red-Green-Blue) fueron integradas y procesadas mediante la herramienta "Map Algebra - Raster Calculator", donde se aplicaron las ecuaciones correspondientes para derivar los valores de cada índice de vegetación.

Análisis estadístico

Se empleó un ANOVA de tres vías para evaluar los efectos principales de cada factor y sus interacciones sobre la vigorosidad de las variedades de maní. Posteriormente, se aplicó la prueba post hoc de Tukey para identificar diferencias significativas entre tratamientos.

Se realizó un análisis de regresión con el algoritmo Random Forest entre los índices calculados y la concentración de clorofila foliar medida con el SPAD

RESULTADOS

Vigorosidad del cultivo maní utilizando la reflectancia como proxy

A partir de la información de los índices espectrales (**Tabla 4**), se obtuvieron los valores promedio de reflectancia para los distintos tratamientos en cada una de las parcelas experimentales, lo que permitió cuantificar las diferencias en la vigorosidad del cultivo de maní (**Tabla 4**).



Figura 2. Índices espectrales calculados. *GLI: Green Leaf Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, RGBVI: Red Green Blue Vegetation Index, MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index y Vigreen: Vegetation Index Green*

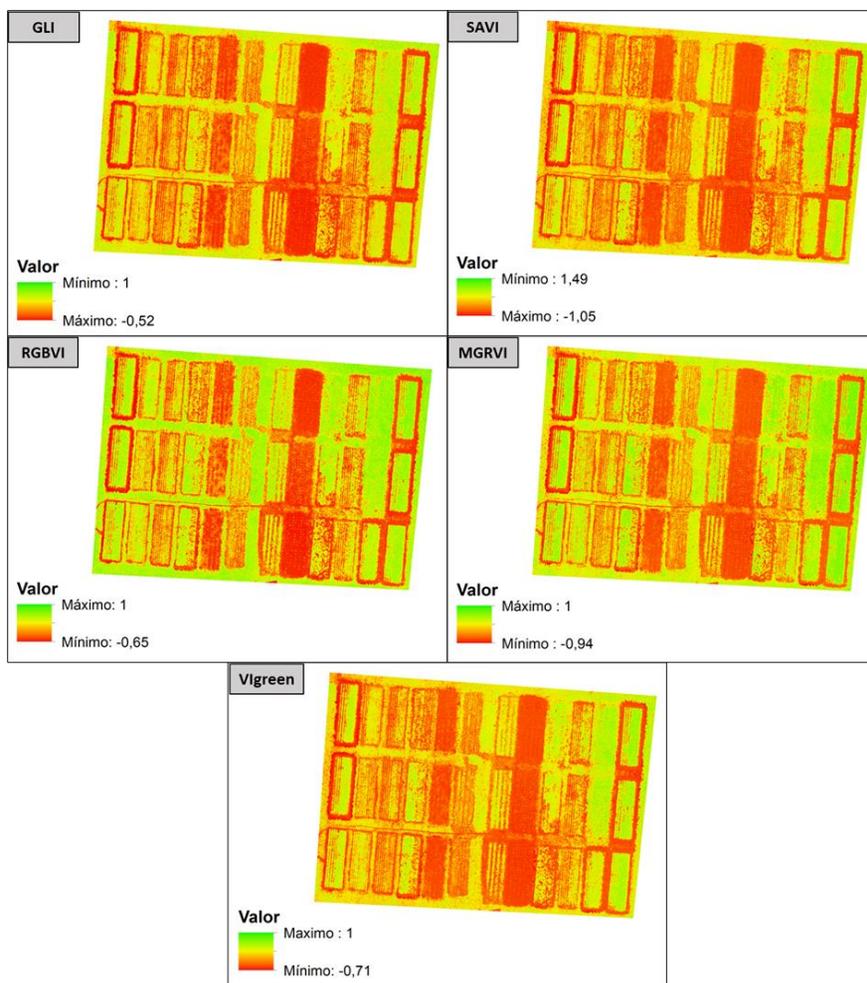


Tabla 4. Valores de los índices espectrales para cada uno de los tratamientos en las parcelas experimentales. *GLI: Green Leaf Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, RGBVI: Red Green Blue Vegetation Index, MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index y Vigreen: Vegetation Index Green.*

| Tratamiento | Variiedad | Densidad | Labranza | GLI | SAVI | RGBVI | MGRVI | Vigreen |
|-------------|-----------|----------|----------|------|------|-------|-------|---------|
| T1 | V1 | D1 | L0 | 0,24 | 0,30 | 0,44 | 0,36 | 0,20 |
| T1 | V1 | D1 | L0 | 0,22 | 0,25 | 0,40 | 0,30 | 0,16 |



| | | | | | | | | |
|-----|----|----|----|------|------|------|------|------|
| T1 | V1 | D1 | LO | 0,19 | 0,22 | 0,36 | 0,27 | 0,15 |
| T2 | V1 | D2 | LO | 0,31 | 0,41 | 0,55 | 0,49 | 0,27 |
| T2 | V1 | D2 | LO | 0,32 | 0,42 | 0,56 | 0,51 | 0,28 |
| T2 | V1 | D2 | LO | 0,30 | 0,42 | 0,54 | 0,50 | 0,28 |
| T3 | V2 | D1 | LO | 0,24 | 0,31 | 0,44 | 0,39 | 0,21 |
| T3 | V2 | D1 | LO | 0,21 | 0,25 | 0,39 | 0,32 | 0,17 |
| T3 | V2 | D1 | LO | 0,22 | 0,27 | 0,41 | 0,33 | 0,18 |
| T4 | V2 | D2 | LO | 0,23 | 0,30 | 0,44 | 0,37 | 0,20 |
| T4 | V2 | D2 | LO | 0,17 | 0,19 | 0,33 | 0,25 | 0,13 |
| T4 | V2 | D2 | LO | 0,26 | 0,29 | 0,48 | 0,37 | 0,20 |
| T5 | V3 | D1 | LO | 0,13 | 0,13 | 0,24 | 0,17 | 0,09 |
| T5 | V3 | D1 | LO | 0,13 | 0,13 | 0,25 | 0,17 | 0,09 |
| T5 | V3 | D1 | LO | 0,12 | 0,12 | 0,24 | 0,15 | 0,08 |
| T6 | V3 | D2 | LO | 0,16 | 0,17 | 0,31 | 0,22 | 0,12 |
| T6 | V3 | D2 | LO | 0,18 | 0,22 | 0,35 | 0,28 | 0,15 |
| T6 | V3 | D2 | LO | 0,18 | 0,21 | 0,35 | 0,27 | 0,14 |
| T7 | V4 | D1 | LO | 0,28 | 0,39 | 0,51 | 0,46 | 0,26 |
| T7 | V4 | D1 | LO | 0,32 | 0,43 | 0,56 | 0,51 | 0,29 |
| T7 | V4 | D1 | LO | 0,17 | 0,19 | 0,32 | 0,24 | 0,13 |
| T8 | V4 | D2 | LO | 0,20 | 0,25 | 0,38 | 0,32 | 0,17 |
| T8 | V4 | D2 | LO | 0,22 | 0,25 | 0,41 | 0,32 | 0,17 |
| T8 | V4 | D2 | LO | 0,11 | 0,10 | 0,22 | 0,14 | 0,07 |
| T9 | V4 | D1 | LC | 0,18 | 0,23 | 0,33 | 0,28 | 0,15 |
| T9 | V4 | D1 | LC | 0,21 | 0,26 | 0,39 | 0,32 | 0,17 |
| T9 | V4 | D1 | LC | 0,31 | 0,42 | 0,56 | 0,51 | 0,28 |
| T10 | V4 | D2 | LC | 0,12 | 0,14 | 0,23 | 0,18 | 0,09 |
| T10 | V4 | D2 | LC | 0,27 | 0,33 | 0,50 | 0,41 | 0,22 |
| T10 | V4 | D2 | LC | 0,33 | 0,43 | 0,59 | 0,52 | 0,29 |
| T11 | V3 | D1 | LC | 0,13 | 0,16 | 0,26 | 0,21 | 0,11 |
| T11 | V3 | D1 | LC | 0,12 | 0,13 | 0,24 | 0,16 | 0,08 |
| T11 | V3 | D1 | LC | 0,17 | 0,20 | 0,33 | 0,26 | 0,14 |
| T12 | V3 | D2 | LC | 0,21 | 0,29 | 0,39 | 0,36 | 0,19 |
| T12 | V3 | D2 | LC | 0,18 | 0,22 | 0,35 | 0,27 | 0,14 |
| T12 | V3 | D2 | LC | 0,24 | 0,32 | 0,45 | 0,40 | 0,22 |



| | | | | | | | | |
|-----|----|----|----|------|------|------|------|------|
| T13 | V2 | D1 | LC | 0,22 | 0,31 | 0,41 | 0,37 | 0,20 |
| T13 | V2 | D1 | LC | 0,35 | 0,49 | 0,60 | 0,57 | 0,33 |
| T13 | V2 | D1 | LC | 0,36 | 0,51 | 0,61 | 0,59 | 0,34 |
| T14 | V2 | D2 | LC | 0,29 | 0,39 | 0,51 | 0,47 | 0,26 |
| T14 | V2 | D2 | LC | 0,35 | 0,51 | 0,61 | 0,59 | 0,34 |
| T14 | V2 | D2 | LC | 0,39 | 0,55 | 0,66 | 0,63 | 0,37 |
| T15 | V1 | D1 | LC | 0,30 | 0,43 | 0,53 | 0,51 | 0,29 |
| T15 | V1 | D1 | LC | 0,29 | 0,41 | 0,52 | 0,48 | 0,27 |
| T15 | V1 | D1 | LC | 0,30 | 0,41 | 0,54 | 0,48 | 0,27 |
| T16 | V1 | D2 | LC | 0,34 | 0,52 | 0,59 | 0,59 | 0,34 |
| T16 | V1 | D2 | LC | 0,34 | 0,49 | 0,59 | 0,57 | 0,33 |
| T16 | V1 | D2 | LC | 0,37 | 0,53 | 0,62 | 0,60 | 0,35 |

El análisis estadístico mostró diferencias significativas con un valor de $p < 0,05$ en el factor A (variedades de maní), Factor C (tipo de labranza y la interacción entre el factor A y el Factor B (Variedades de maní y densidad de siembra)).

Tabla 5. Resultados del análisis estadístico de varianza (ANOVA) tri factorial. GLI: Green Leaf Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, RGBVI: Red Green Blue Vegetation Index, MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index y VIgreen: Vegetation Index Green.

| INTERACCIÓN | GLI | SAVI | RGBVI | MGRVI | VIgreen |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Factor A | <0,00 | <0,00 | <0,00 | <0,00 | <0,00 |
| Factor B | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,05 |
| Factor C | 0,00 | <0,00 | 0,00 | 0,00 | <0,00 |
| Factor A * Factor B | 0,06 | 0,02 | 0,06 | 0,05 | 0,02 |
| Factor A * Factor C | 0,17 | 0,06 | 0,31 | 0,12 | 0,06 |
| Factor B * Factor C | 0,40 | 0,35 | 0,45 | 0,39 | 0,35 |
| Factor A * Factor B * Factor C | 0,49 | 0,45 | 0,47 | 0,38 | 0,45 |

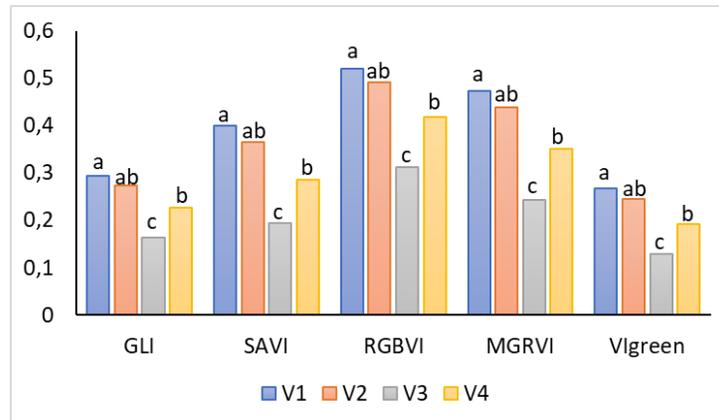
Donde valor $< 0,05$ indican diferencia significativa entre los factores analizados.



Como se observa en la **Figura 3**, las variedades V_1 (INIAP 381) y V_2 (INIAP 383) presentaron una mayor vigorosidad, evidenciada por la reflectancia captada a través de los índices espectrales. Esto sugiere que el tipo de variedad utilizada puede desarrollar mejores condiciones fenológicas bajo distintas condiciones edafológicas y climáticas (El-Hendawy et al., 2015). En términos edafológicos, estas variedades han demostrado una mayor tolerancia a suelos con limitantes como baja fertilidad, salinidad o compactación. Por ejemplo, su sistema radicular más desarrollado les permite acceder a nutrientes y agua en profundidades mayores, lo que es crucial en suelos con baja retención de humedad o con problemas de estrés hídrico (Fernando et al., 2021). Su alta eficiencia en el uso de nutrientes, incluso en suelos con poco fósforo o nitrógeno, las hace adecuadas para suelos degradados.

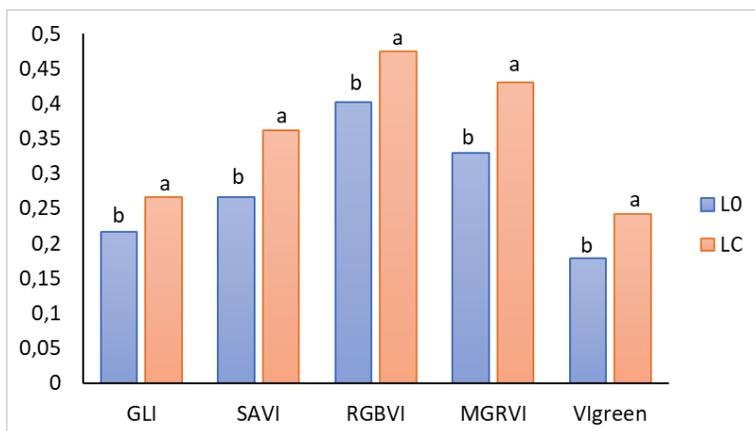
En cuanto a las condiciones climáticas, las variedades V_1 y V_2 han mostrado una notable resiliencia frente a factores como la sequía, las altas temperaturas y la variabilidad climática. Esto se debe, a su capacidad para regular la transpiración y mantener un balance hídrico óptimo, incluso en condiciones de estrés (Wajhat et al., 2019).

Figura 3. *Efecto de las variedades de maní en la reflectancia de los índices espectrales. V_1 : INIAP 380, V_2 : INIAP 383, V_3 : INIAP 380, V_4 : INIAP 382, GLI: Green Leaf Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, RGBVI: Red Green Blue Vegetation Index, MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index y VIgreen: Vegetation Index Green. Letras pequeñas distintas sobre cada barra representan diferencias significativas en los valores de reflectancia entre las variedades de maní*



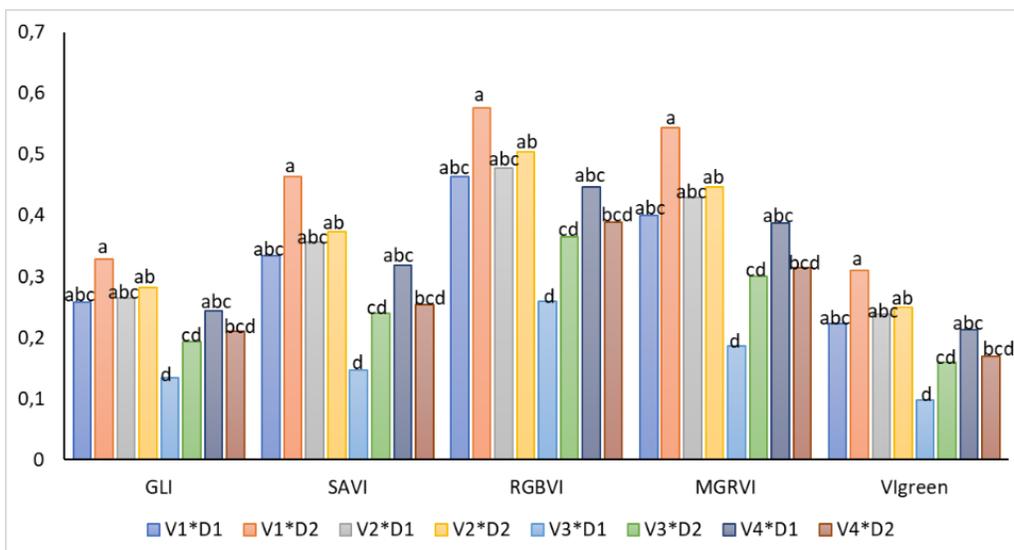
En cuanto al tipo de labranza aplicado, los tratamientos en parcelas sembradas bajo un sistema de labranza convencional (L_C) mostraron un mayor vigor en las plantas de maní en comparación con la labranza cero (L_0) mostrando valores de reflectancia de $0,40 \pm 0,10$ con el índice RGBVI (Figura 4). Esto sugiere que la L_C favorece el desarrollo del cultivo, como lo destacan Betiol et al., (2023) y Raghuwanshi et al., (2024) en sus investigaciones. Estos autores señalan que la aplicación de L_C mejora la disponibilidad de nutrientes y la filtración de agua en el suelo, factores clave para el vigor y la productividad de los cultivos.

Figura 4. Resultado del efecto del tipo de labranza aplicado en la reflectancia de los índices espectrales. L_0 : Labranza cero, L_C : Labranza convencional, GLI: Green Leaf Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, RGBVI: Red Green Blue Vegetation Index, MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index y Vlgreen: Vegetation Index Green. Letras pequeñas distintas sobre cada barra representan diferencias significativas entre los tratamientos.



En cuanto al efecto de la interacción entre las variedades y la densidad de siembra (**Figura 5**), se observará que las parcelas con la variedad V₁: INIAP 381 sembrada bajo la densidad D₂ (0,20 x 0,80 m), mostró una mayor vigorosidad del cultivo, reflejada en la reflectancia de los índices espectrales, sobre todo con el RGBVI (0,58 ± 0,03). Estos resultados coinciden con investigaciones previas que sugieren que un aumento en la densidad de siembra puede mejorar diversos parámetros de crecimiento al optimizar la competencia y el aprovechamiento de los recursos del suelo (SWETHASREE et al., 2024)

Figura 6. Resultados del efecto de la interacción entre las variedades de maní y la densidad de siembra aplicados en la reflectancia de los índices espectrales calculados. V₁: INIAP 380, V₂: INIAP 383, V₃: INIAP 380, V₄: INIAP 382, D₁: densidad uno (0,20x0,50 m), D₂: densidad dos (0,20x0,80 m), GLI: Green Leaf Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, RGBVI: Red Green Blue Vegetation Index, MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index y Vlgreen: Vegetation Index Green. Letras pequeñas distintas sobre cada barra representan diferencias significativas entre los tratamientos.



Entre los índices espectrales evaluados, el índice RGBVI (Red-Green Blue Vegetation Index) registró los valores más altos de reflectancia, con un rango de 0,26 a 0,58. Este resultado superó ampliamente los rangos observados en los otros índices analizados, como el MGRVI (Modified Green Red Vegetation Index), que presentó un rango de reflectancia de 0,19 a 0,54, y el SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), con un rango de 0,15 a 0,48 (Tabla 6). La superioridad del RGBVI en términos de sensibilidad espectral sugiere que este índice tiene una mayor capacidad para captar la variabilidad del cultivo, influenciada por factores como la variedad, la densidad de siembra y el tipo de labranza aplicado.

Tabla 6. Valores promedio de los índices espectrales para cada una de las interacciones que reflejaron diferencia estadística significativa ($p < 0,05$). GLI: Green Leaf Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, RGBVI: Red Green Blue Vegetation Index, MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index y Vlgreen: Vegetation Index Green.

| Factores | | Interacción | GLI | SAVI | RGBVI | MGRVI | Vlgreen |
|----------|----------------------------|-------------|------|------|-------|-------|---------|
| Factor A | V ₁ : INIAP 381 | | 0,29 | 0,40 | 0,52 | 0,47 | 0,27 |
| | V ₂ : INIAP 383 | | 0,27 | 0,36 | 0,49 | 0,44 | 0,24 |
| | V ₃ : INIAP 380 | | 0,16 | 0,19 | 0,31 | 0,24 | 0,13 |
| | V ₄ : INIAP 382 | | 0,23 | 0,29 | 0,42 | 0,35 | 0,19 |



| | | | | | | |
|-------------------|---|------|------|------|------|------|
| Factor C | L ₀ : Labranza cero | 0,22 | 0,27 | 0,40 | 0,33 | 0,18 |
| | L _c : Labranza convencional | 0,27 | 0,36 | 0,48 | 0,43 | 0,24 |
| Factor A*Factor B | V ₁ (INIAP 381) * D ₁ (0,2x0,5 m) | 0,26 | 0,33 | 0,46 | 0,40 | 0,22 |
| | V ₁ (INIAP 381) * D ₂ (0,2x0,8 m) | 0,33 | 0,46 | 0,58 | 0,54 | 0,31 |
| | V ₂ (INIAP 383) * D ₁ (0,2x0,5 m) | 0,26 | 0,36 | 0,48 | 0,43 | 0,24 |
| | V ₂ (INIAP 383) * D ₂ (0,2x0,8 m) | 0,28 | 0,37 | 0,50 | 0,45 | 0,25 |
| | V ₃ (INIAP 380) * D ₁ (0,2x0,5 m) | 0,13 | 0,15 | 0,26 | 0,19 | 0,10 |
| | V ₃ (INIAP 380) * D ₂ (0,2x0,8 m) | 0,19 | 0,24 | 0,37 | 0,30 | 0,16 |
| | V ₄ (INIAP 382) * D ₁ (0,2x0,5 m) | 0,24 | 0,32 | 0,45 | 0,39 | 0,21 |
| | V ₄ (INIAP 382) * D ₂ (0,2x0,8 m) | 0,21 | 0,25 | 0,39 | 0,31 | 0,17 |

Tabla 7. Resultados del análisis de regresión con el algoritmo Random Forest.

| Random Forest | | | |
|---------------|----------------|------|------|
| Clorophyll | | | |
| | R ² | MSE | MAE |
| GLI | 0,11 | 0,02 | 0,09 |
| RGBVI | 0,12 | 0,02 | 0,12 |
| SAVI | 0,33 | 0,05 | 0,10 |
| MGRVI | 0,51 | 0,01 | 0,09 |
| Vigreen | 0,73 | 13,2 | 3,18 |

La efectividad del Vigreen como indicador de la vigorosidad del cultivo de maní radica en su capacidad para reflejar con precisión el estado fisiológico de las plantas, como lo indica su alta correlación con la concentración de clorofila en las plantas ($R^2 = 0,73$). Este hallazgo es particularmente relevante, ya que el Vigreen puede ser calculado utilizando imágenes capturadas con cámaras estándar RGB, lo que representa una ventaja significativa en comparación con tecnologías más complejas y costosas, como los sensores multiespectrales o hiperespectrales. La accesibilidad de las cámaras RGB no solo reduce los costos asociados con la monitorización de cultivos, sino que también democratiza el uso de técnicas avanzadas de análisis espectral, especialmente en regiones con recursos limitados o en sistemas agrícolas de pequeña y mediana escala.



Esta posibilidad está respaldada por estudios previos, como el de Pacheco y Montilla, (2020), quienes destacan la utilidad de los índices basados en imágenes RGB para aplicaciones en diversas condiciones agrícolas, reforzando la viabilidad de su implementación a gran escala. Estos autores resaltan que, a pesar de su simplicidad, las cámaras RGB pueden proporcionar información valiosa para la monitorización de cultivos, especialmente en contextos donde el acceso a tecnologías más avanzadas es limitado. De manera similar, Ponce et al., (2024), evidenciaron que la teledetección mediante imágenes RGB permite obtener datos detallados y actualizados sobre el estado de los cultivos. En su estudio, analizaron índices como el Vgreen, que registró valores de reflectancia entre 0,10 y 0,25, y el GLI, con un rango de 0,17 a 0,32. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en la presente investigación, donde el Vgreen mostró un rango de reflectancia de 0,10 a 0,27 y el GLI un rango de 0,13 a 0,33. Aunque estos índices fueron los que registraron los rangos más bajos de reflectancia en este estudio, su similitud con los hallazgos de Ponce et al., (2024) sugiere que tienen una capacidad confiable para captar la variabilidad en la vigorosidad de los cultivos. Esta consistencia entre estudios refuerza la validez de estas herramientas y su aplicabilidad en diferentes tipos de cultivos y condiciones agrícolas. Además, estos resultados consolidan el valor de los índices basados en imágenes RGB como herramientas accesibles y efectivas para la agricultura de precisión, especialmente en regiones donde la adopción de tecnologías más complejas no es viable.

Fortalecimiento del Sector Manicero y Políticas Públicas en Ecuador

La implementación de tecnologías geoespaciales y agricultura de precisión, tiene un potencial significativo para revitalizar la cadena de valor del maní en Ecuador, un sector que ha experimentado una notable reducción en su producción en los últimos años (Cuenca et al., 2021). Los resultados obtenidos con el uso del índice Vgreen y cámaras RGB demuestran que el monitoreo eficiente del cultivo puede



ser accesible y económicamente viable, lo que resulta fundamental para fomentar la adopción tecnológica por parte de los productores (Delgado Marcillo, et al., 2024).

Desde una perspectiva de políticas públicas, es imprescindible el diseño de programas que impulsen la transferencia tecnológica hacia el sector agrícola, fomentando la capacitación en herramientas de monitoreo de cultivos y la integración de técnicas de agricultura de precisión. Esto permitiría una optimización de recursos y un incremento en la productividad del maní, generando mayores incentivos para los agricultores (Bello Parra et al., 2023).

En el ámbito económico, el apalancamiento del sector manicero mediante políticas de financiamiento agrícola y la adopción de sistemas de certificación de calidad podría incrementar su rentabilidad, favoreciendo la integración de los pequeños y medianos productores a cadenas de valor más robustas (Jiménez Guayanay & Peña Merino, 2021). Esto contribuiría a la reactivación de un sector clave para la diversificación agroproductiva y la seguridad alimentaria del país, fortaleciendo el desarrollo rural y mejorando la calidad de vida de los agricultores.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El índice Vlgreen demostró ser el más efectivo entre los índices espectrales evaluados, registrando los valores más sensibles en las interacciones analizadas, el cual tuvo una correlación de fuerza alta con variables biofísicas como la concentración de clorofila en la hoja. Esto lo convierte en un indicador prometedor para evaluar la vigorosidad del cultivo de maní, permitiendo identificar con precisión el estado fisiológico de las plantas.

Las variedades INIAP-381 e INIAP-383 mostraron una mayor vigorosidad en comparación con las otras variedades evaluadas, lo que sugiere que estas



variedades pueden adaptarse mejor a diferentes condiciones edafológicas y climáticas.

La interacción entre la variedad INIAP-381 y una densidad de siembra de 62.500 plantas/hectárea (pl/ ha) (0,20 x 0,80 m) resultó en una mayor reflectancia, indicando un mejor aprovechamiento de los recursos y una mayor vigorosidad del cultivo.

El uso de cámaras RGB y el índice Vigreen ofrece una alternativa accesible y económica para el monitoreo de cultivos, especialmente en regiones con recursos limitados. En términos de costos, las cámaras RGB son aproximadamente 94% más económicas que los sensores multispectrales y 99.4% más económicas que los sensores hiperespectrales (Lv et al., 2024). Esta reducción significativa en el costo no solo democratiza el acceso a tecnologías de monitoreo agrícola, sino que también reduce la dependencia de equipos especializados y software costoso, manteniendo una capacidad aceptable para evaluar la salud y el vigor de los cultivos.

Los resultados respaldan la viabilidad de implementar estas técnicas a gran escala en la agricultura de precisión, facilitando la toma de decisiones y mejorando la eficiencia en el uso de recursos agrícolas.

Desde una perspectiva de políticas públicas y reactivación agroproductiva, la integración de tecnologías geoespaciales y técnicas de agricultura de precisión constituye una herramienta estratégica para incrementar la eficiencia y rentabilidad del cultivo de maní en Ecuador.

REFERENCIAS BIBLIORAFICAS

Al-Qubati, A., Zhang, L., & Forkel, M. (2024). Urban and peri-urban agriculture under climate change: A review on carbon emissions and sequestration.



- Sustainable Cities and Society, 115, 105830.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105830>
- Anfruns España, L. (2023). USE AND IMPLEMENTATION OF RGB AND MULTISPECTRAL SENSORS INSTALLED IN DRONES FOR THE MONITORING OF COFFEE CROPS. *GeoFocus*, 2023(31), 5-38. <https://doi.org/10.21138/GF.800>
- Bello Parra, R. O., Valarezo Beltrón, C. O., & Valarezo Molina, M. J. (2023). Diagnóstico de la cadena de valor de mantequilla de maní en Tosagua, Ecuador. *ECA Sinergia*, 14(3), 91-104. <https://doi.org/10.33936/ECASINERGIA.V14I3.5754>
- Betiol, O., Bolonhezi, D., Leal, É. R. P., Gruener, C. E., Michelotto, M. D., Furlani, C. E. A., & Ruiz, F. F. (2023). Conservation agriculture practices in a peanut cropping system: Effects on pod yield and soil penetration resistance. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 47. <https://doi.org/10.36783/18069657RBCS20230004>
- Cedeño Vélez, S. J. (2023). Niveles de fertilización en el cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.) [Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí]. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/4628>
- Cuenca, K., Quizhpe C., W. R., & Ramírez-Iglesias, E. (2021). Evaluación de sustentabilidad en sistemas de producción de maíz y maní en la provincia de Loja, Ecuador. *Agronomía Tropical*, 71: e4567645. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4567645>
- El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N., Salem, A. E. A., Ur Rehman, S., & Schmidhalter, U. (2015). Spectral reflectance indices as a rapid and nondestructive phenotyping tool for estimating different morphophysiological traits of contrasting spring wheat germplasms under arid conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(4), 572-587. <https://doi.org/10.3906/tar-1406-164>
- FAO. (2018). *Perspectivas por sectores principales*. 1-43. <https://www.fao.org/3/y3557s/y3557s04.pdf>
- Fernando, K. M. C., Ehoche, O. G., Atkinson, J. A., & Sparkes, D. L. (2021). Root system architecture and nitrogen uptake efficiency of wheat species. *Journal of Agricultural Sciences - Sri Lanka*, 16(1), 37-53. <https://doi.org/10.4038/jas.v16i1.9182>
- Hernández-Cole, J., Villalobos-Barquero, V., Guevara-Bonilla, M., & Ortiz-Malavasi, E. (2023). Planificación de vuelos y procesamiento de datos de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) en el monitoreo de plantaciones forestales. <https://doi.org/https://doi.org/10.18845/rfmk.v21i48.7041>



- IGM. (2016). GEODESIA Manual de Especificaciones Técnicas Levantamiento Geodésicos-Control Horizontal.
- Ingole, R. S., Ingole, N. S., Khandelwal, R. R., & Kalambe, J. P. (2024). Detection of Crop Disease and Spraying of Pesticides using Drone. 2024 IEEE 9th International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2024. <https://doi.org/10.1109/I2CT61223.2024.10543617>
- Jiménez Guayanay, T. A., & Peña Merino, S. B. (2021). Análisis de mercadeo y comercialización en la cadena de valor de maní arachis hypogaea l., en la provincia de Loja [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec//handle/123456789/23759>
- Kamenova, I., Filchev, L., & Ilieva, I. (2017). REVIEW OF SPECTRAL VEGETATION INDICES AND METHODS FOR ESTIMATION OF CROP BIOPHYSICAL VARIABLES. 29.
- López Rodríguez, S., van Bussel, L. G. J., & Alkemade, R. (2024). Classification of agricultural land management systems for global modeling of biodiversity and ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360, 108795. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2023.108795>
- Lóránt, B., Veronika, K.-B., & József, B. (2024). Comparison of RGB Indices used for Vegetation Studies based on Structured Similarity Index (SSIM). *Journal of Plant Science and Phytopathology*, 8(1), 007-012. <https://doi.org/10.29328/JOURNAL.JPSP.1001124>
- Lv, X., Zhang, X., Gao, H., He, T., Lv, Z., & Zhangzhong, L. (2024). When crops meet machine vision: A review and development framework for a low-cost nondestructive online monitoring technology in agricultural production. *Agriculture Communications*, 2(1), 100029. <https://doi.org/10.1016/J.AGRCOM.2024.100029>
- Marin, D. B., Rossi, G., Araújo, G., Ferraz, S., Dorbu, F., & Hashemi-Beni, L. (2024). Detection of Individual Corn Crop and Canopy Delineation from Unmanned Aerial Vehicle Imagery. *Remote Sensing 2024*, Vol. 16, Page 2679, 16(14), 2679. <https://doi.org/10.3390/RS16142679>
- Moreira, B. R. de A., Marra, T. M., Silva, E. A. da, Brito Filho, A. L. de, Barbosa Júnior, M. R., Santos, A. F. dos, Silva, R. P. da, & Vellidis, G. (2024). Advancements in peanut mechanization: Implications for sustainable agriculture. *Agricultural Systems*, 215, 103868. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2024.103868>
- Pacheco Gil, H. A., & Montilla Pacheco, A. de J. (2020). RGB Spectral Indices for the Analysis of Soil Protection by Vegetation Cover against Erosive



- Processes. Soil Erosion - Current Challenges and Future Perspectives in a Changing World. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.95055>
- Ponce Conforme, A. M., Rodríguez Mala, A. S., & Pacheco Gil, H. A. (2024). Condiciones agronómicas del cultivo de arroz con imágenes de vehículos aéreos no tripulados. *Revista Científica Multidisciplinaria SAPIENTIAE*. ISSN: 2600-6030, 7(14), 35-54. <https://doi.org/10.56124/SAPIENTIAE.V7I14.0003>
- Qu, H., Zheng, C., Ji, H., Barai, K., & Zhang, Y. J. (2024). A fast and efficient approach to estimate wild blueberry yield using machine learning with drone photography: Flight altitude, sampling method and model effects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216, 108543. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2023.108543>
- Raghuwanshi, S., Chaudhary, R. S., Somasundaram, J., Sinha, N. K., Trivedi, S. K., Kurmi, P., Vijayaraje, R., Krishi, S., Vidyalyaya, V., Gwalior, M., & Pradesh, I. (2024). A Comparative Study of Long-Term Conventional and No-Tillage Practices on the Basis of Available Soil Nutrients, Soil Organic Carbon and Crop Productivity in Black Soils of Central India. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 561-571. <https://doi.org/10.9734/AJSSPN/2024/V10I3369>
- Shojaeezadeh, S., Elnashar, A., & Weber, T. K. D. (2024). Estimating Crop Phenology from Satellite Data using Machine Learning. *EGU24*. <https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU24-15347>
- Sumesh, K. C., Ninsawat, S., & Som-ard, J. (2021). Integration of RGB-based vegetation index, crop surface model and object-based image analysis approach for sugarcane yield estimation using unmanned aerial vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105903. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105903>
- SWETHASREE, M., SUDHAKAR, P., UMAMAHESH, V., PRATHIMA, T., & KRISHNA, T. G. (2024). Effect of planting density on yield and architecture suitability of groundnut (*Arachis hypogaea*) varieties. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 94(3), 297-302. <https://doi.org/10.56093/IJAS.V94.I3.138914>
- Wajhat, N., V, N., SA, N., & ZA, D. (2019). Drought tolerance mechanism in wheat: A Review. *The Pharma Innovation*, 714-724. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.22271/tpi>
- Zhang, P., Lu, B., Ge, J., Wang, X., Yang, Y., Shang, J., La, Z., Zang, H., & Zeng, Z. (2025). Using UAV-based multispectral and RGB imagery to monitor above-ground biomass of oat-based diversified cropping. *European Journal of Agronomy*, 162, 127422. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2024.12742>