

Aplicación de índices vegetales (banda roja e infrarrojo cercano) en plantaciones de aguacate

Application of vegetable indices (red band and near infrared) in avocado and orchards

Anderson Mauricio Guerrón Barahona¹, William Fernando Viera Arroyo²,
Diego Fabricio Campaña Cruz³, Laura Viviana Vásquez Rojas⁴,
Carlos Lenin Montufar Delgado⁵



Siembra 9 (1) (2022): e3371

Recibido: 26/09/2021 Revisado: 25/10/2021 / 01/03/2022 Aceptado: 21/03/2022

¹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas.
Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria.
170521. Quito, Ecuador.

✉ amguerron@uce.edu.ec

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-4446-8065>

² Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP.
Avenida Interoceánica Km 15 y Eloy Alfaro. 170902.
Tumbaco, Pichincha, Ecuador.

✉ william.viera@iniap.gob.ec

🌐 <https://orcid.org/0000-0003-4472-4126>

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP.
Avenida Interoceánica Km 15 y Eloy Alfaro. 170902.
Tumbaco, Pichincha, Ecuador.

⁴ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas.
Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria.
170521. Quito, Pichincha, Ecuador.

✉ lvvasquez@uce.edu.ec

🌐 <https://orcid.org/0000-0001-9849-0607>

⁵ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas.
Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria.
170521. Quito, Pichincha, Ecuador.

✉ clmontufar@uce.edu.ec

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-4707-0837>

*Autor de correspondencia: william.viera@iniap.gob.ec

Resumen

El aguacate es una fruta tradicional en la dieta de los ecuatorianos y requiere un manejo adecuado que garantice su producción. La implementación de nuevas alternativas tecnológicas, como utilización de índices de espectroscopia, permite obtener datos que al correlacionarlos optimizarán el manejo del cultivo. Esta investigación validó el uso de índices vegetales basados en la banda roja e infrarrojo cercano con el contenido de nitrógeno foliar. Se utilizó los índices vegetales: índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) e índice de vegetación transformado (TVI) desde dos ortomosaicos obtenidos mediante imágenes que capturan banda roja e infrarrojo cercano en plantaciones de aguacate. Se realizaron regresiones y correlaciones entre los índices vegetales y los resultados de los análisis foliares de contenido de nitrógeno, generando valores de R^2 de 0,93 para NDVI y 0,95 para TVI. Los valores de los índices vegetales pueden utilizarse para estimar el vigor de la planta basado en el contenido de nitrógeno foliar.

Palabras clave: contenido de nitrógeno foliar, frutales, índice de vegetación, índices de espectroscopia, vigor.

Abstract

Avocado is a traditional fruit in the diet of Ecuadorians and requires proper crop handling to guarantee high production. Implementations of new technological alternatives such as spectroscopy indexes that correlating each other will allow optimize avocado crop management. This research validated the use of red band and near infrared-based plant indices with leaf nitrogen content. The plant indices used were normalized differential vegetation index (NDVI) and transformed vegetation index (TVI). These indexes were developed from two orthomosaics obtaining images that capture red and near infrared bands. Regression and correlation analysis were performed between the vegetable indices and the foliar nitrogen content analysis, generating R^2 values of 0.93 for NDVI, and 0.95 for TVI. The values of the plant indexes can be used to estimate plant vigor based on the nitrogen content of the foliar area.

Keywords: foliar nitrogen content, fruit trees, vegetation index, spectroscopy index, vigor.

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

e-ISSN: 2477-8850

ISSN: 1390-8928

Periodicidad: semestral

vol. 9, núm. 1, 2022

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3371>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

1. Introducción

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es una fruta tradicional en la dieta de los ecuatorianos, su delicado sabor se convierte en el complemento perfecto para acompañar los platos típicos de la cocina en el ámbito mundial y generalmente se lo consume fresco. En el Ecuador, las principales zonas productoras de aguacate son Carchi, Imbabura, Pichincha, Tungurahua, Azuay y Loja (Viera *et al.*, 2016). Según los datos de las estadísticas agropecuarias de los años 2018 y 2019, se cultivaron alrededor de 6.164 y 7.125 hectáreas de aguacate, respectivamente, con una media de producción de 2,9 y 3,7 t ha⁻¹, respectivamente (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC] 2018; 2019). Lamentablemente el incremento del número de árboles no garantiza un aumento proporcional en la producción; en el caso del aguacate es debido a la falta de implementación de un manejo agronómico adecuado (fertilización, riego, controles fitosanitarios y labores culturales) y a la implementación de nuevas alternativas tecnológicas que permitan aumentar la producción significativamente (Viera *et al.*, 2016).

La agricultura tradicional es vulnerable a diferentes fenómenos de tipo climático y a la ocurrencia de plagas, que cada vez son más nocivas y resilientes a agroquímicos tradicionales. El uso de nuevas tecnologías en la agricultura va direccionada a mejorar la producción y disminuir los costos (Berrio Meneses *et al.*, 2018).

La evaluación de algunas características fisiológicas que reflejan el estado sanitario, nutrimental e hídrico de las plantas requiere de instrumentos sofisticados que permiten establecer una medición sistemática para analizar los cambios o variaciones de las plantas en respuesta a ciertos estímulos como la adición de nutrimentos o algún otro factor que limite o promueva su desarrollo. En la actualidad, existen diversos índices de espectroscopia que se usan en la evaluación del comportamiento de algunos cultivos (López-Aguilar *et al.*, 2016) y se los puede relacionar con elementos importantes para la nutrición de la planta, siendo el nitrógeno uno de los más relevantes para el desarrollo del cultivo de aguacate (Gaona *et al.*, 2020; Viera *et al.*, 2021).

Para el uso de estos índices, el acceso a ortofotos mediante el uso de sensores multiespectrales tradicionales ha sido un obstáculo, dado los costos de adquisición, la información y cantidad de bandas que generan estos equipos. Sin embargo, la aplicación de una cámara modificada para detección únicamente de banda roja e infrarrojo cercano reduce el costo, ya que utiliza bandas reflejadas por la superficie vegetal; esta tecnología permite monitorear los sembríos, realizar un diagnóstico nutricional y predecir el rendimiento en varios cultivos (Zheng *et al.*, 2018).

El empleo de vehículos aéreos no tripulados, equipados con cámaras multiespectrales, posibilita obtener información de toda una plantación con una resolución muy precisa, lo que permite el cálculo de índices a fin de integrar la información sobre diferentes aspectos vegetales (Vilanova de la Torre *et al.*, 2018).

El procesamiento de imágenes con información por píxel para obtener índices vegetales, se encuentra en su mayoría dado por software bajo licencia (Martínez y Mendoza España, 2014); por lo que esta investigación hizo uso de software libre (QGIS 2.18, Agisoft Photo Scan y DroneDeploy) para la elaboración y procesamiento matricial puntual de las imágenes con distintos índices vegetales: Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI) e Índice de vegetación transformado (TVI), obteniéndose una herramienta para conocer el estado de vigor de los cultivos de especies frutales. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo validar un método que permita obtener índices vegetales de aguacate basados en la banda roja e infrarrojo cercano y correlacionarlos con una escala de vigor visual y contenido de nitrógeno foliar.

2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación del sitio experimental

La plantación de aguacate (4.673 m²) se ubica en la granja experimental Tumbaco del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP], dentro de la provincia de Pichincha, cantón Quito, coordenadas: 0°12'54,19" sur, 78°24'48,484" oeste; 0°12'54,19" sur, 78°24'36,543" oeste, con una precipitación anual de 900 mm, humedad relativa 75 %, temperatura promedio anual de 18 °C, orden de suelo Andisol, textura franco-arenosa, pendiente del 2 al 5 %, relieve ondulado.

2.2. Recopilación de imágenes en campo

Se realizó la toma de imágenes mediante el software DroneDeploy, diseñándose la ruta a seguir por el dron (Modelo inspire 1, sistema GLONASS + GPS) sobre las plantaciones en estudio. Además, se programó la altura a la que se elevó el dron (70 m), y la ruta a seguir por el dron fue usada para dos vuelos, el primero con la cámara RGB (Zenmuse X3) y la segunda con la cámara de detección de rojo e infrarrojo cercano (Zenmuse X3 DJI). La fotografía obtenida con la cámara RGB permitió la visualización del lote y ésta se colocó sobre la fotografía de rojo e infrarrojo para reconocer los árboles testigo. Los vuelos se realizaron al mediodía (12:00 m) con la finalidad de evitar sombras generadas por los árboles que podían afectar los datos.

2.3. Clasificación del ortomosaico (RGB y detección de rojo e infrarrojo cercano)

Antes de iniciar la clasificación de las imágenes tomadas en campo se decidió generar un archivo que contenga todas las imágenes captadas por el dron; esto se lo realizó con el software Agisoft Photo Scan, cuyo programa utilizó las coordenadas que cada imagen contiene para generar un solo archivo.

- **Calibración de imagen:** El software Agisoft Photo Scan generó información de las bandas roja (RED) e infrarrojo cercano (NIR), información que se subió en el programa QGIS para realizar la calibración de luz mediante el complemento de QGIS, llamado MAPIR, el cual reduce el error en la imagen producido por efecto de la radiación solar que distorsiona la información de cada pixel y genera pérdida de informa-

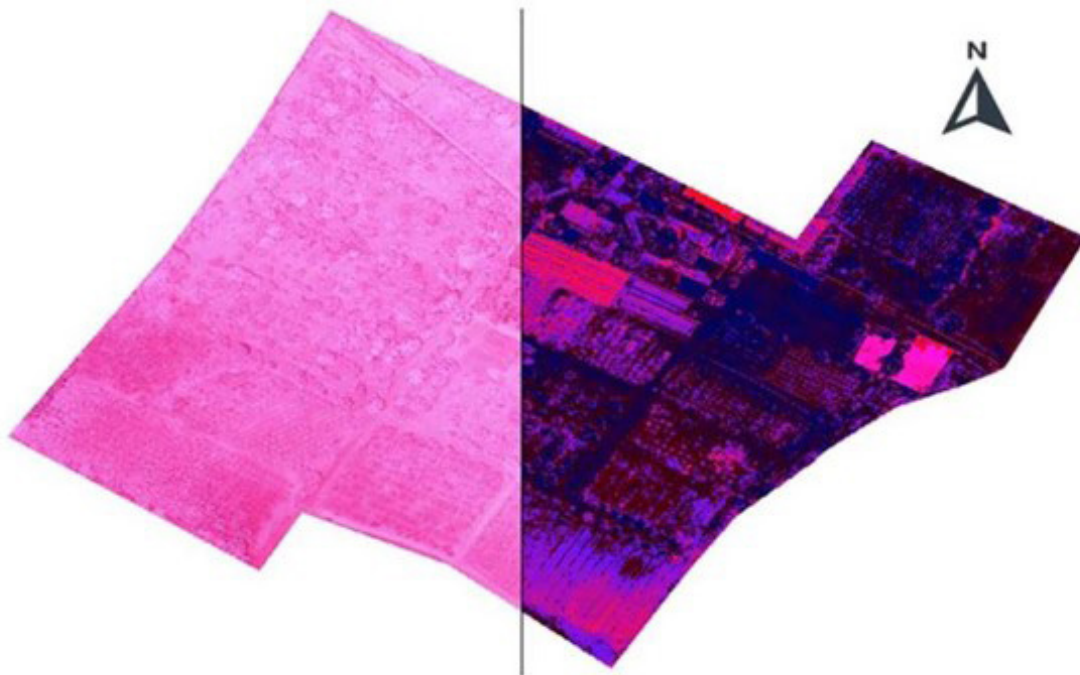


Figura 1. Calibración de luz en el programa QGIS.
Figure 1. Light calibration using the QGIS software.

ción verdadera (Figura 1).

- **Cálculo del Índice de vegetación transformado (TVI):** Se realizó mediante la ecuación [1]

$$TVI = \sqrt{\frac{NIR-RED}{NIR+RED}} + 0,5 \quad [1]$$

2.4. Cálculo de la muestra

La parcela de aguacate estuvo conformada por una población total de 68 árboles, información que se utilizó para determinar el tamaño de la muestra mediante la ecuación [2].

$$\text{Tamaño de la muestra} = \frac{\frac{z^2 * p(1-p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 * p(1-p)}{e^2 N}\right)} \quad [2]$$

Donde, N es el tamaño de la población, z es el nivel de confianza, p es la probabilidad de éxito, y e es el margen de error. El nivel de confianza utilizado fue 95 %, con un margen de error del 10 %, obteniéndose una muestra de 39 árboles.

2.5. Árboles control

En los árboles definidos como control se realizó la medición de los índices vegetales (NDVI y TVI), los que permitieron conocer su estado de vigor, además se realizó la toma de muestras foliares de estos árboles para determinar su contenido de nitrógeno y corroborar los valores de los índices con el contenido de este elemento mediante una regresión, a fin de establecer la confiabilidad de los índices. Para la elección de los árboles de control se establecieron categorías (grande, intermedia y pequeña) con base en el diámetro de la copa del árbol. Se midió el diámetro ecuatorial desde el extremo norte al extremo sur de la copa del árbol. Los árboles con copa menor a 2 m se consideraron como copa pequeña, entre 2 y 4 m como copa intermedia y mayor a 4 m como copa grande. Esta variable se escogió para realizar la categorización debido a que el área foliar está relacionada directamente con los resultados de las imágenes espectrales. Además, en los árboles control se midió la altura de la planta (m) desde el nivel de suelo hasta la punta de la copa y el diámetro del fuste (m) a una altura de 1,2 m desde el suelo.

2.6. Cálculo de estadística individual en cada árbol

Una vez que al ortomosaico de bandas roja e infrarrojo cercano se le dio una clasificación para cada índice aplicado, se procedió a establecer el valor de los índices por cada árbol control, para lo cual en el programa QGis se generó un archivo de tipo Shape, con el cual se trazó las copas de los árboles control. Este proceso se lo realizó con la finalidad de que el archivo Shape actúe como una capa máscara sobre el ortomosaico, creando una tabla de contenido que únicamente obtiene información de un área específica de la capa clasificada con los índices aplicados, generando un promedio por píxel de las copas de los árboles de control.

2.7. Toma de muestras para análisis foliar

Para el análisis foliar se seleccionaron las hojas que se encuentran a la altura media de la copa y las que se encuentran distribuidas alrededor de toda la copa, tomando un aproximado de 100 g de hojas por árbol. Las hojas muestreadas estuvieron maduras y fueron tomadas con peciolo y limbo, de ramas que no presentaban frutos. Las muestras foliares se colectaron en bolsas de papel con la respectiva identificación, fueron almacenadas en recipientes herméticos y previamente secadas con papel absorbente (Campos León y Calderón Zaragoza, 2015), para luego ser enviadas al laboratorio de Suelos y Aguas del INIAP, donde fueron procesadas, determinándose el nitrógeno total con el método de Kjeldahl.

2.8. Relación estadística entre resultados de los índices vegetales y análisis foliar de nitrógeno

Se realizó la evaluación de los árboles seleccionados, comparando los datos del contenido de nitrógeno con su respectivo valor de índice vegetal, para lo cual se realizó un análisis de regresión entre los valores de los índices para cada árbol de control con su respectiva concentración de nitrógeno, lo que permitió determinar el nivel de vigor en la plantación.

3. Resultados y Discusión

3.1 Registro de imágenes

Como resultado del registro de imágenes se obtuvieron 188 fotografías por cada ortomosaico (Figura 2). Individualmente cada fotografía cuenta con 40.000 puntos de referencia con el fin de generar con exactitud cada mosaico. En total se registraron 376 fotografías para los dos ortomosaicos empleados (rojo e infrarrojo cercano y RGB), que fueron calibradas para su interpretación.

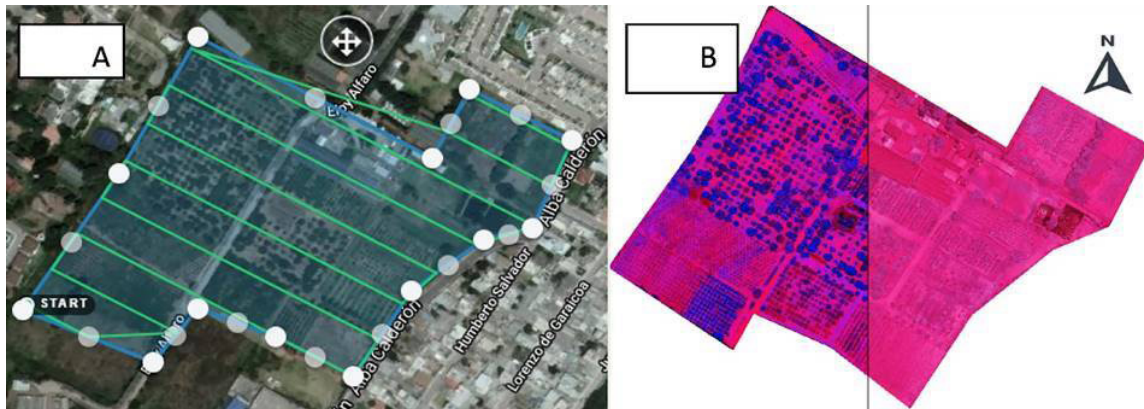


Figura 2. A. Plan de vuelo programado por DroneDeploy. B. imagen calibrada (derecha). Escala 1:2500.
 Figure 2. Flight plan programmed by DroneDeploy. B. calibrated image (right). Scale 1: 2500.

3.2 NDVI para árboles de aguacate

Como resultado de la ecuación se obtuvo la capa de NDVI a escala de grises para todos los lotes, a la cual se le asignó una diferente gama de color para identificar con facilidad los índices generados, siendo los valores superiores a 0,1 para el índice NDVI los que representan el material vegetal (Meneses Tovar, 2012; Piscoya Pérez, 2019). Se obtuvieron valores de NDVI que fueron de -0,65 a 0,26 (Figura 3); debiéndose mencionar que las imágenes se registraron en época seca generando valores de NDVI bajos y que los valores negativos se debieron a que en la parcela existieron árboles muertos (secos) debido al ataque de marchitez radicular, pero que no habían sido retirados del campo. Los estudios realizados por Escobar Pardo (2015) y Crusiol *et al.* (2017), en estudios realizados en banano (*Musa AAA Simmonds*) y soya (*Glycine max*), respectivamente, determinaron que el NDVI tiende a variar según la etapa fenológica en la que se encuentre el cultivo. Si la planta se encuentra en una fase productiva los valores de NDVI disminuirán, dado que la concentración de nutrientes se dirige de las hojas hacia los frutos.

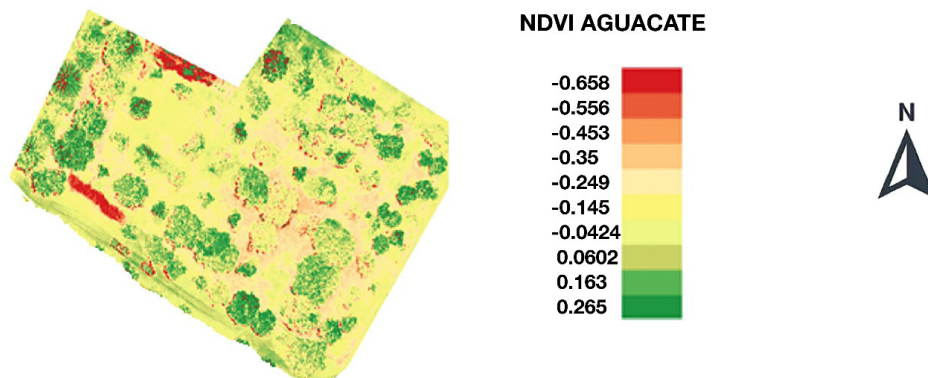


Figura 3. NDVI generado para la parcela evaluada de Aguacate. Escala 1:500.
 Figure 3. NDVI generated for the evaluated plot of Avocado. Scale 1: 500.

3.3. TVI para árboles de aguacate

Como resultado de la ecuación de TVI, se obtuvo la capa a escala de grises, donde se le asignó una diferente gama de color para identificar con mayor facilidad los índices generados. Los valores de TVI no suelen diferir de los valores de NDVI, para el caso del TVI se incluyó el factor 0,5, el cual genera valores positivos a los índices obtenidos. Valores mayores de 0,6 reflejan vegetación y mientras este valor se aproxime a 1 representará material vegetal con mayor acumulación de clorofila (Juzga Solanilla, 2016). El índice TVI identificó la presencia de clorofila en la copa de los árboles de aguacate que obtuvo valores de 0,01 a 0,95 (Figura 4). Pat López (2015) determinaron que los valores de los índices vegetales permiten tener una estimación del estado actual de vigor del cultivo, incluso de manera gráfica. En el estudio se observó que las plantas tuvieron buen vigor.

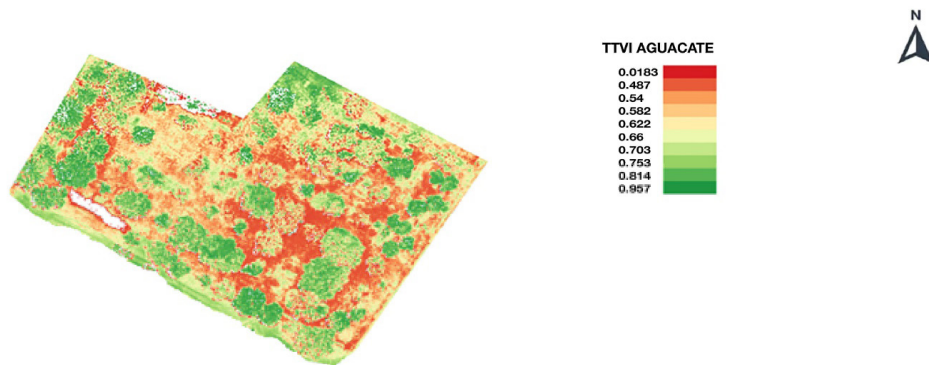


Figura 4. TVI generado para la parcela de Aguacate. Escala 1:500.

Figure 4. TVI generated for the Avocado plot. Scale 1: 500.

3.4 Resultados de los árboles control

Se realizó un análisis foliar a los árboles de control de aguacate, para lo cual se seleccionaron 39 árboles (Figura 5), que estaban distribuidos en las categorías establecidas previamente. Los árboles de control fueron categorizados con base en el diámetro de la copa y en éstos se midió la altura de la planta y el diámetro del fuste (Tabla 1). No se observó una correlación entre la copa del árbol con la altura de la planta (-0,20) y el diámetro del fuste (0,08).



Figura 5. Distribución en los lotes de árboles control de aguacate. Escala 1:500.

Figure 5. Distribution in the plots of avocado control trees. Scale 1: 500.

Tabla 1. Clasificación de los árboles control de aguacate en base al diámetro de la copa del árbol.
 Table 1. Classification of avocado control trees based on crown diameter.

Código*	Diámetro de la copa (m)	Altura de la planta (m)	Diámetro del fuste (m)	Código*	Diámetro de la copa (m)	Altura de la planta (m)	Diámetro del fuste (m)
CG1	4,82	3,47	1,06	CI6	3,21	4,06	0,90
CG2	5,17	2,98	1,30	CI7	3,52	3,37	1,50
CG3	5,14	2,57	0,80	CI8	3,93	3,04	0,89
CG4	4,31	4,09	0,99	CI9	3,17	3,81	1,04
CG5	4,14	3,48	1,58	CI10	3,61	3,42	1,30
CG6	5,07	3,07	1,10	CI11	3,17	4,30	1,36
CG7	4,17	2,52	1,01	CI12	3,19	3,69	1,11
CG8	4,21	4,56	1,49	CI13	3,17	2,81	1,11
CG9	5,17	3,94	1,21	CP1	2,62	4,83	1,54
CG10	4,19	3,81	1,05	CP2	2,96	3,72	0,87
CG11	5,17	3,18	1,12	CP3	2,69	3,26	1,30
CG12	4,81	3,59	1,24	CP4	2,47	3,12	0,95
CG13	4,01	3,68	1,26	CP5	2,86	3,05	0,99
CG14	4,10	2,71	0,70	CP6	2,72	3,96	1,06
CG15	4,24	3,93	1,15	CP7	2,91	4,37	0,95
CI1	3,17	2,46	0,87	CP8	2,62	3,19	1,25
CI2	3,67	3,17	1,48	CP9	2,04	3,62	1,16
CI3	3,71	4,51	1,47	CP10	2,43	3,89	0,71
CI4	3,89	3,81	1,35	CP11	2,71	3,41	0,95
CI5	3,89	3,72	0,71				

* Categorías: CG = grande, CI = intermedia, CP = pequeña.

La Tabla 2 muestra los valores obtenidos para los índices NDVI, TVI y contenido de nitrógeno foliar de los árboles control. Para el cultivo de aguacate, se encontró valores de contenido de nitrógeno entre 1,21 a 2,46 %, lo que es similar a lo expresado por Méndez-García *et al.* (2008) y Sotelo-Nava *et al.* (2017), quienes mencionan que el contenido normal de nitrógeno foliar en este cultivo se encuentra entre los valores de 1,60 a 2,80 %, lo que indicaría que los árboles se encuentran en un estado de vigor intermedio. Los valores de los índices vegetales permiten establecer tendencias de productividad debido a que posibilitan estimar, por medio de la reflectancia, el estado de vigor de la planta, lo que se relaciona directamente con el contenido de nutrientes de la planta, específicamente con el elemento nitrógeno (Zenteno Cruz *et al.*, 2017).

3.5. Regresión entre valores NDVI y resultados del análisis foliar

Se generó una regresión entre valores de NDVI y el contenido de nitrógeno del cultivo de aguacate (Figura 6), observándose un valor de R^2 de 0,93. Sanjerehei (2014) obtuvo valores similares de R^2 (0,97) en vegetación en un estudio similar con imágenes espectrales. Además, estudios realizados en trigo durum (*Triticum turgidum* L. var. durum) confirman la relación que existe entre los valores de NDVI y los análisis foliares, ya que obtuvieron también valores altos de R^2 (0,87 a 0,94) (Cabrera-Bosquet *et al.*, 2011; Vian *et al.*, 2018). De igual manera ocurrió en estudios realizados en maíz (*Zea mays*) donde se obtuvo valores de R^2 de 0,90 (Maresma *et al.*, 2016). Por otro lado, el estudio realizado por Hashemi *et al.* (2013) generó valores de R^2 de 0,45, siendo inferior a los valores obtenidos en este estudio.

Tabla 2. Valores de los índices aplicados y contenido de nitrógeno en aguacate.
Table 2. Values of the applied indices and nitrogen content in avocado.

Código*	Nitrógeno (%)	NDVI	TVI	Código*	Nitrógeno (%)	NDVI	TVI
CG1	2,19	0,13	0,81	CI6	1,42	-0,11	0,61
CG2	1,66	0,01	0,71	CI7	2,17	0,11	0,79
CG3	2,18	0,12	0,81	CI8	1,34	-0,14	0,59
CG4	1,98	0,07	0,78	CI9	2,06	0,11	0,79
CG5	1,80	0,05	0,74	CI10	1,50	-0,03	0,67
CG6	1,82	0,07	0,76	CI11	1,79	0,05	0,75
CG7	1,87	0,07	0,75	CI12	1,52	-0,02	0,68
CG8	1,62	0,01	0,77	CI13	2,02	0,11	0,78
CG9	1,89	0,07	0,78	CP1	1,31	-0,14	0,60
CG10	1,72	0,03	0,73	CP2	1,49	-0,07	0,65
CG11	1,60	-0,01	0,70	CP3	1,36	-0,13	0,59
CG12	2,33	0,14	0,81	CP4	2,02	0,09	0,77
CG13	2,23	0,13	0,82	CP5	1,70	0,02	0,72
CG14	1,21	-0,15	0,51	CP6	2,25	0,14	0,82
CG15	2,46	0,16	0,82	CP7	1,77	0,04	0,79
CI1	1,49	-0,05	0,65	CP8	2,24	0,13	0,80
CI2	1,43	-0,07	0,64	CP9	1,40	-0,12	0,60
CI3	2,01	0,09	0,76	CP10	1,67	0,02	0,71
CI4	1,62	0,01	0,71	CP11	1,55	-0,01	0,69
CI5	1,42	-0,09	0,62				

* Categorías: CG = grande, CI = intermedia, CP = pequeña.

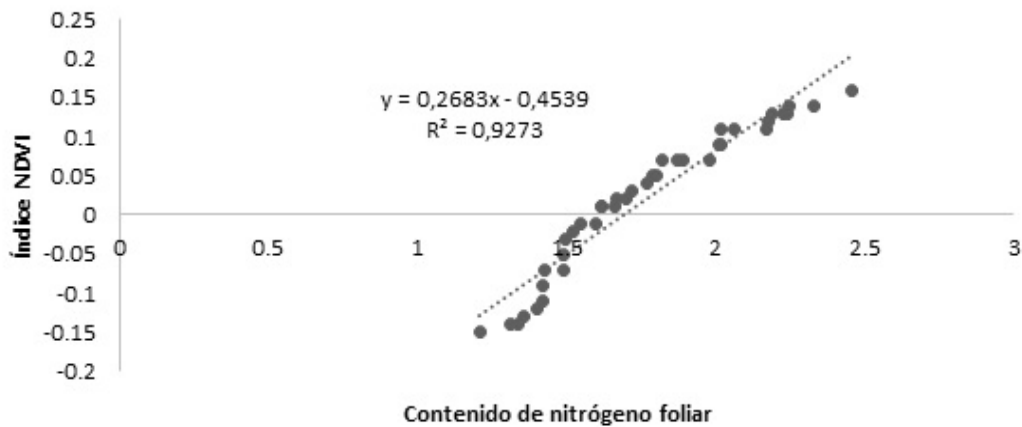


Figura 6. Índice NDVI contrastado con el contenido de nitrógeno foliar.
Figure 6. NDVI index contrasted with foliar nitrogen content.

Los valores de NDVI generados pueden ser utilizados para estimar variaciones en el contenido de nitrógeno de árboles de aguacate, lo cual permitiría determinar el vigor de la planta, el cual, cuando disminuye podría deberse a una deficiencia nutricional o problemas fitosanitarios. Según Escobar Pardo (2015) y Casassa Bastres (2019), en estudios realizados en banano (*Musa AAA Simmonds*) y maíz forrajero (*Zea mays*) determinaron que la interacción entre el contenido de nitrógeno y el valor de NDVI de la planta produjo valores de R^2 de 0,72 y 0,90, respectivamente, lo que indica que estos dos parámetros se correlacionan muy bien; sin embargo, también indican que dichos valores de R^2 tienden a variar según la etapa fenológica en la cual se encuentren los cultivos, pudiendo ser dicha correlación mayor en una etapa vegetativa y menor en una etapa productiva de la planta.

El incremento en el NDVI, debido a una mayor acumulación de biomasa, se debe a una mayor disponibilidad de N_2 , lo que resulta en un aumento en el contenido de nitrógeno en las hojas. Cuanto mayor es la acumulación de biomasa fotosintéticamente activa, mayor es la reflectancia de la radiación infrarroja cercana y menor la reflectancia de la radiación roja, lo que resulta en un aumento de NDVI (Smith *et al.*, 2017).

Estudios realizados por Ramos García (2015) indican que la reflectancia de las longitudes de onda roja e infrarrojo en la planta dependen de factores como: tamaño de la hoja, contenidos de nitrógeno, absorción lumínica; sin embargo, el nitrógeno es el elemento mayormente relacionado a la reflectancia de las bandas roja e infrarrojo cercano, donde indica que si la planta se encuentra en un estado de acumulación de nitrógeno mayor, la reflectancia de las bandas roja e infrarrojo cercano será menor, generando índices con valores mayores.

3.6. Regresión entre valores TVI con resultados del análisis foliar

Se generó una regresión entre valores de TVI y el contenido de nitrógeno del cultivo de aguacate (Figura 7), obteniéndose un valor de R^2 de 0,95. Estudios en maíz realizados por Hunt *et al.* (2013) obtuvieron valores de R^2 (0,64) menores a los de este estudio. El TVI no alcanza un límite superior, lo que reduce los efectos de la saturación de biomasa asintótica y lo hace mejor para estimar la alta biomasa; además, este índice es menos eficaz en la diferenciación a baja biomasa debido a la disminución de la sensibilidad del índice (Prabhakara *et al.*, 2015). Estudios realizados en café (*Coffea arabica*) indican que el estado fisiológico del cultivo es un factor a tomar en cuenta al momento de determinar el contenido de nitrógeno y con ello sus valores en índices vegetales. Esto, por cuando la planta se encuentra en una etapa productiva, donde los frutos tienden a extraer mayor cantidad de nitrógeno de ésta, y tiende a reducir el contenido del mismo en las hojas, lo que deriva en un contenido menor de nitrógeno y con ello la reflectancia de las ondas roja e infrarrojo cercano incrementan, generando valores en los índices vegetales menores, a diferencia de cuando la planta se encuentra en una etapa de crecimiento vegetativa donde la acumulación de nitrógeno en las hojas es mayor provocando menor reflectancia (Rendón Sáenz y Sadehian Khalajabadi, 2018).

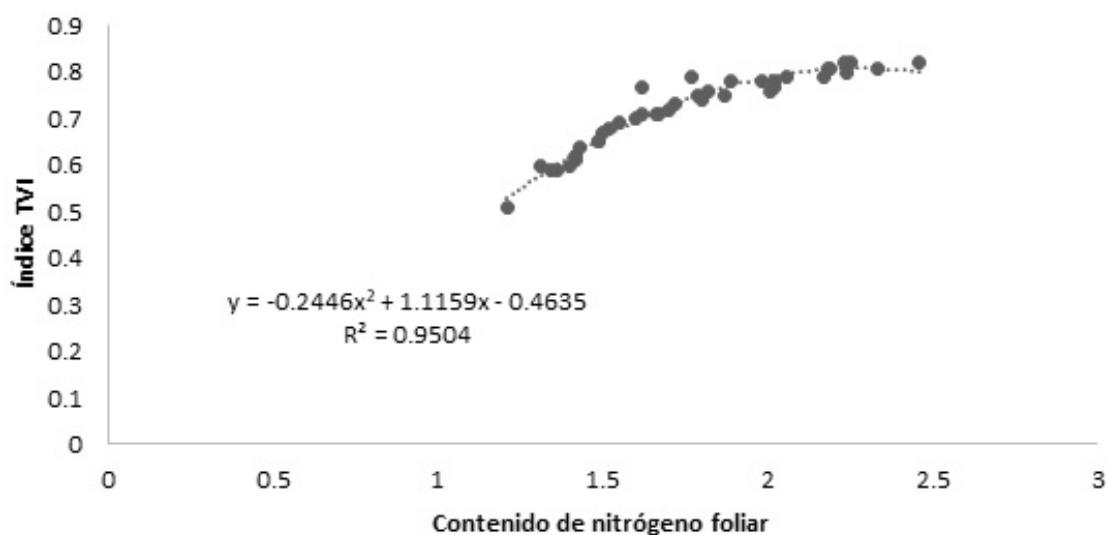


Figura 7. Índice TVI contrastado con el contenido de nitrógeno foliar.
Figure 7. TVI index contrasted with foliar nitrogen content.

Pat López (2015) determinaron valores de regresión entre el contenido de nitrógeno y valores de índices vegetales en aguacate, estableciendo valores de R^2 de 0,65, valor inferior al obtenido en este estudio. Nuestros resultados indicarían que se puede establecer una valoración con el uso de índices vegetales, dado que expresan un estado de vigor similar a los expresados por los resultados del contenido de nitrógeno en la planta.

4. Conclusión

No hubo una correlación entre la variable referencia (diámetro de la copa del árbol) y las variables de crecimiento vegetal del árbol de aguacate (altura de la planta y diámetro del fuste). La correlación entre los índices vegetales y el contenido de nitrógeno obtuvo un valor de R^2 aceptable, por lo que las ecuaciones obtenidas en esta investigación podrían ser utilizadas para estimar el contenido de este elemento en plantaciones de frutales establecidos en áreas cercanas a la zona de estudio.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y FONTAGRO a través del Proyecto Productividad y Competitividad Frutícola Andina, por el financiamiento y soporte para la realización de esta investigación. Agradecemos al Ing. Renán Dávila de la empresa Mantis View por el soporte técnico a esta investigación.

Un reconocimiento al Ing. Diego Campaña, compañero y amigo, quien contribuyó en la realización de este artículo científico.

Financiamiento

Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO), proyecto Productividad y Competitividad Frutícola Andina, ATN/RF-16111-RG/FONTAGRO.

Contribuciones de los autores

- Anderson Mauricio Guerrón Barahona: curación de datos, análisis formal, investigación, metodología.
- William Fernando Viera Arroyo: conceptualización investigación, adquisición de fondos, administración del proyecto, recursos, supervisión, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.
- Diego Fabricio Campaña Cruz: redacción-borrador original, redacción – revisión y edición.
- Laura Viviana Vásquez Rojas: conceptualización, supervisión, investigación, redacción – revisión y edición.
- Carlos Lenin Montufar Delgado: conceptualización, curación de datos, análisis formal, software, supervisión, visualización, redacción – revisión y edición.

Referencias

- Berrio Meneses, V., Alzate Velásquez, D. F., Ramón Valencia, J. A., y Ramón Valencia, J. L. (2018). Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. *Revista Espacios*, 39(45), 18. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n45/18394518.html>
- Cabrera-Bosquet, L., Molero, G., Stellacci, A., Bort, J., Nogués, S., y Araus, J. (2011). NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Research Communications*, 39(1), 147-159. <https://doi.org/10.1556/crc.39.2011.1.15>
- Campos León, M. B., y Calderón Zaragoza, E. M. (2015). *El análisis foliar para el diagnóstico nutritivo de plantaciones de aguacate. Toma de muestras*. Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servi-fapa/173568a2-8844-49a7-a873-da0f7139fbe0>
- Casassa Bastres, D. A. 2019. *Relación entre NDVI y contenido de nitrógeno en un cultivo de maíz forrajero en el agroecosistema de Valdivia*. Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2019/fac335r/doc/fac335r.pdf>
- Crusiol, L. G. T., Carvalho, J. F. C., Sibaldelli, R. N. R., Neiverth, W., Do Rio, A., Ferreira, L. C., Procópio, S. O., Mertz-Henning, L. M., Nepomuceno, A. L., Neumaier, N., y Farias, J. R. B. (2017). NDVI variation

- according to the time of measurement, sampling size, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars. *Precision Agriculture*, 18(4), 470-490. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9465-6>
- Escobar Pardo, O. (2015). *Respuestas espectrales a la fertilización con nitrógeno y potasio en el cultivo del banano (Musa AAA Simmonds), caso Municipio Zona Bananera*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56137>
- Gaona, P., Vásquez, L., Viera, W., Morales, C., Viteri, P., Sotomayor, A., Medina, L., Mejía, P., y Cartagena, Y. (2020). Efecto de dos niveles de nitrógeno y potasio aplicados por fertirriego en las variables de crecimiento y concentración de macro y micronutrientes en plantas de aguacate (*Persea americana* Mill.) Var. Hass. *Revista Científica Ecuatoriana*, 7(2), 41-48. <https://doi.org/10.36331/revista.v7i2.114>
- Hashemi, S. A., Fallah Chai, M. M., y Bayat, S. (2013). An analysis of vegetation indices in relation to tree species diversity using by satellite data in the northern forests of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(9), 3363-3369. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0576-8>
- Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M., y Akhmedov, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2018). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua-2018*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-2018/>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2019). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua-2019*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-2019/>
- Juzga Solanilla, M. (2016). *Comparación de índices de vegetación en el cerro La Conejera de la ciudad de Bogotá*. Universidad Militar Nueva Granada. <http://hdl.handle.net/10654/15663>
- López-Aguilar, H. A., García-Pérez, J. L., Barrientos-Juárez, E., Gómez, J. A., y Pérez-Hernández, A. (2016). Método no destructivo para evaluar el vigor vegetal en especies forestales cultivadas en vivero. En *Sistema Internacional de Agronomía*. Durango. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/1765>
- Maresma, Á., Ariza, M., Martínez, E., Lloveras, J., y Martínez-Casasnovas, J. A. (2016). Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a Standard UAV Service. *Remote Sensing*, 8(12), 973. <https://doi.org/10.3390/rs8120973>
- Martínez, J. M., y Mendoza España, M. C. (2014). Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el sistema TDPS. En M. Pouilly, X. Lazzaro, D. Point, y M. Aguirre (eds.), *Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca* (pp. 81-95). UICN e IRD. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010062841>
- Méndez-García, T., Palacios-Mayorga, S., y Rodríguez-Domínguez, L. (2008). Análisis de suelo, foliar y de calidad del agua para el cultivo del aguacatero. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 75-84. <https://www.terra-latinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1375>
- Meneses Tovar, C. L. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyva: Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 62(238), 39-46. <https://www.fao.org/3/i2560s/i2560s07.pdf>
- Pat López, E. R. (2015). *Niveles nutricionales, color y reflectancia espectral de las hojas de los árboles en huertas de aguacate (Persea americana) en Michoacán*. Universidad de Quintana Roo. <http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/371>
- Piscoya Pérez, L. R. (2019). Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el distrito de Puquina, Moquegua. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/144>
- Prabhakara, K., Hively, W. D., y McCarty, G. W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>
- Ramos García, C. A. (2015). *Método para estimar el contenido de nitrógeno en cultivos de maíz (Zea mays L.) con base en espectrometría. Caso de estudio: Puerto Gaitán, Meta*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56151>

- Rendon **Sáenz**, J., y Sadehian Khalajabadi, S. (2018). Aplicación de índices espectrales para identificar necesidades de fertilización nitrogenada en café. *Cenicafé*, 69(1), 7-15. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/1088>
- Sanjerehei, M. (2014). Assessment of spectral vegetation indices for estimating vegetation cover in arid and semiarid shrublands. *Range Management and Agroforestry*, 35(1), 91-100. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:rma&volume=35&issue=1&article=015>
- Smith, H. L., McAusland, L., y Murchie, E. H. (2017). Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. *Journal of Experimental Botany*, 68(9), 2099-2110. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx098>
- Sotelo-Nava, H., Hernández-Castro, E., Villegas-Torres, O. G., Nava, A. D., Sabino-López, J. E., Chino-Cantor, A., Cruz Lagunas, B., y Álvarez Vargas, D. (2017). Nutritional diagnosis of "Hass" avocado (*Persea americana* Mill.) soil fertility and water quality, in Tepoztlán, Morelos. *International Journal of Environmental & Agriculture Research*, 3(1), 152-159. <https://ijoea.com/issue-detail/issue-January-2017>
- Vian, A. L., Bredemeier, C., Turra, M. A., Giordano, C. P. S., Fochesatto, E., Silva, J. A., y Drum, M. A. (2018). Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). *Ciencia Rural*, 48(9), e20170743. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170743>
- Viera, A., Sotomayor, A., y Viera, W. (2016). Potencial del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill) en Ecuador como alternativa de comercialización en el mercado local e internacional. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 3(3), 1-9. <https://doi.org/10.26423/rctu.v3i3.192>
- Viera, W., Cartagena, Y., Toaquiza, J., Gaona, P., Viteri, P., Sotomayor, A., y Medina, L. (2021). Response of 'Hass' avocado under different nitrogen and potassium fertilizer regimes in subtropical Ecuador. *Acta Horticulturae*, 1327, 175-180. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1327.23>
- Vilanova de la Torre, M. M., Pérez, R., Cancela, J. J., Fandiño, M., Teijeiro, M. T., Rey, B. J., Mirás-Avalos, J., Pan, D., y González, X. P. (2018). Uso de imágenes multiespectrales para la determinación de la calidad aromática del cv. Mencía. En *Actas de Horticultura. III Symposium Nacional de Ingeniería Hortícola, I Symposium Ibérico de la SECH* (pp. 171-175). Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Comunicaciones 78. <http://hdl.handle.net/10261/175104>
- Zenteno Cruz, G. A., Palacios Vélez, E., Tijerina Chávez, L., y Flores Magdaleno, H. (2017). Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1575-1586. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.513>
- Zheng, H., Cheng, T., Li, D., Zhou, X., Yao, X., Tian, Y., Cao, W., y Zhu, Y. (2018). Evaluation of RGB, color-infrared and multispectral images acquired from unmanned aerial systems for the estimation of nitrogen accumulation in rice. *Remote Sensing*, 10(6), 824. <https://doi.org/10.3390/rs10060824>