

Modelamiento topográfico y determinación de los índices espectrales de los estados fenológicos del camu camu (*Myrciaria dubia* HBK) en Yarinacocha

Topographic modeling and determination of the spectral indexes of the phenological states of camu camu (*Myrciaria dubia* HBK) in Yarinacocha

Milton Miguel Pirro Lozano

milton_pirro@unu.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-8554-4979>

Universidad Nacional de Ucayali (UNU), Carretera Federico Basadre km 6,2, Callería, Ucayali, Perú.

Pablo Pedro Villegas Panduro

pablo_villegas@unu.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-9300-8113>

Universidad Nacional de Ucayali (UNU), Carretera Federico Basadre km 6,2, Callería, Ucayali, Perú;

Dennis Francis Verde García

teamsac.ucayali@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-4026-8636>

Tecnología Espacio y Ambiente SAC, Jr. Moquegua 184, Callería, Ucayali, Perú

Sucena Elizabeth Moreno Moreno

sucena_moreno@unu.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0006-9783-9188>

Universidad Nacional de Ucayali (UNU), Carretera Federico Basadre km 6,2, Callería, Ucayali, Perú

Roger Brayán Braga Sandoval

roger_braga@unu.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-5794-1587>

Universidad Nacional de Ucayali (UNU), Carretera Federico Basadre km 6,2, Callería, Ucayali, Perú

Roger Vásquez Gómez

roger_vasquez@unu.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-5427-7329>

Universidad Nacional de Ucayali (UNU), Carretera Federico Basadre km 6,2, Callería, Ucayali, Perú

Resumen

La investigación evaluó el modelamiento topográfico y la determinación de índices espectrales durante los estados fenológicos del cultivo de camu camu (*Myrciaria dubia* H.B.K.) en los sectores de San Juan, San José y San Lorenzo, en Yarinacocha, Ucayali. Para ello, se utilizó un dron Matrice 600 Pro equipado con una cámara multiespectral Parrot Sequoia de cinco sensores (RGB, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano). El vuelo fue programado mediante los softwares DJI GO y DJI GS Pro, abarcando una hectárea por sector. Las imágenes capturadas se procesaron con los programas QGIS 3.28.8 y Metashape 2.0.2, generando mapas topográficos e índices de vegetación (NDVI) correspondientes a las fases de brotamiento y floración del cultivo. Los resultados indicaron que las imágenes multiespectrales pueden ser utilizadas para el modelamiento topográfico de las plantas de camu camu y determinar el área efectiva de las plantaciones. Asimismo, determinó que, los índices de vegetación en los sectores evaluados difieren mucho en cuanto al estado fenológico del cultivo de camu camu, siendo el NDVI en la fase de brotamiento, de 0,34 a 0,37, siendo este moderadamente abundante, sin embargo, en la fase de floración disminuye drásticamente a -0,44 a -0,37, siendo este valor muy bajo.

Palabras clave: teledetección, imagen multiespectral, vegetación, dron, NDVI.

Abstract

The research evaluated the topographic modeling and the determination of spectral indices during of spectral indices during the phenological stages of the camu camu crop (*Myrciaria dubia* H.B.K.) in the sectors of San Juan, San José and San Lorenzo, in Yarinacocha, Ucayali. For this purpose, a Matrice 600 Pro drone equipped with a Parrot Sequoia multispectral camera with five sensors (RGB, green, red, red edge and near infrared) was used. The flight was programmed using DJI GO and DJI GS Pro software, covering one hectare per sector. The captured images were processed with QGIS 3.28.8 and Metashape 2.0.2 programs, generating topographic maps and vegetation indices (NDVI) corresponding to the budding and flowering phases of the crop. The results indicated that multispectral images can be used for topographic modeling of camu camu plants and to determine the effective area of the plantations. It also determined that the vegetation indices in the evaluated sectors differ greatly in terms of the phenological stage of the camu camu crop, being the NDVI in the budding phase, from 0.34 to 0.37, being moderately abundant, however, in the flowering phase it decreases drastically to -0.44 to -0.37, being this value very low.

Key words: remote sensing, multispectral imaging, vegetation, drone, NDVI.

Introducción

El camu camu (*Myrciaria dubia*) es una de las fuentes naturales más ricas en vitamina C, además de contener compuestos fenólicos y antocianinas que le otorgan propiedades antioxidantes importantes para la prevención de enfermedades crónicas (Franco et al., 2020).

El camu camu es un fruto con alto valor nutricional y propiedades funcionales para la salud, gracias a su elevado contenido de vitamina C y compuestos fenólicos. Estos le otorgan efectos antioxidantes, antiinflamatorios, antimicrobianos, hepatoprotectores, antidiabéticos y neuroprotectores, lo que contribuye a fortalecer el sistema inmunológico, prevenir enfermedades crónicas y mejorar el estado general de salud. Por ello, se considera un fruto funcional con gran potencial terapéutico (Faria et al., 2011).

Los estados fenológicos del camu camu comprenden etapas clave de su desarrollo, desde la brotación hasta la maduración de los frutos, y son esenciales para su manejo agronómico. Estas fases incluyen la brotación, el crecimiento vegetativo, la floración, la fructificación, la maduración y la senescencia, cada una influenciada por las condiciones ambientales del ecosistema amazónico. Su conocimiento permite un mejor aprovechamiento del cultivo y optimización de la producción (Pinedo et al., 2004).

Los índices espectrales son herramientas matemáticas basadas en la combinación de bandas espectrales obtenidas por sensores remotos, que permiten destacar características biofísicas de la vegetación, como el vigor, la clorofila o el estrés hídrico. Son fundamentales en la agricultura de

precisión, ya que facilitan el monitoreo de cultivos y mejoran la toma de decisiones agronómicas (Zarco et al., 2014).

Los índices espectrales son fundamentales en la agricultura por su capacidad para monitorear de forma remota y precisa el estado fisiológico de los cultivos, evaluando variables como el vigor, la biomasa, la clorofila y el estrés hídrico. Esto permite una gestión agronómica más eficiente, optimiza el uso de insumos y mejora el rendimiento, promoviendo una agricultura sostenible y rentable (Navarro et al., 2020).

Los índices espectrales ofrecen múltiples ventajas en la agricultura, como el monitoreo no destructivo, amplia cobertura espacial, detección temprana de problemas, optimización de insumos, seguimiento continuo del desarrollo de cultivos y reducción de costos, lo que contribuye a una gestión más eficiente y rentable del proceso agrícola (Fiorio & Demattê, 2021).

En agricultura se utilizan diversos índices espectrales para monitorear características biofísicas de los cultivos. Entre los más comunes están: NDVI, que evalúa el vigor vegetal; EVI, que mejora la detección en vegetación densa; GNDVI, que mide mejor la clorofila; SAVI, que corrige la influencia del suelo; NDWI, que indica el contenido de agua en la vegetación; y CWSI, que detecta el estrés hídrico mediante temperatura del dosel vegetal (Xue & Su, 2017).

El NDVI es uno de los índices más usados en agricultura de precisión, ya que se basa en la diferencia entre la radiación infrarroja cercana y la roja para estimar la biomasa, el vigor y la salud de la vegetación (Rouse et al., 1974). El Índice de Vegetación Mejorado (EVI) es una versión optimizada del NDVI que corrige los efectos del suelo y la atmósfera, siendo más eficaz en zonas con vegetación densa (Huete et al., 1997). El Índice de Estrés Hídrico (CWSI) mide el estrés hídrico de las plantas comparando la temperatura del dosel vegetal con condiciones óptimas y de déficit hídrico (Idso et al., 1981). El Índice de Vegetación por Diferencia Simple (SR) es un índice básico que se calcula como la razón entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo, y es útil para caracterizar la cobertura vegetal (Jordan, 1969).

Ríos et al. (2021), realizaron estudio en camu camu en la Amazonía peruana, demostrado que, los índices espectrales como NDVI, SAVI y EVI permiten un monitoreo preciso del desarrollo fenológico y del estado fitosanitario de las plantas, representando una herramienta clave para la agricultura de precisión en este cultivo.

Dávila & Delgado (2021), en sus investigaciones realizadas en la región Loreto, Perú, demostraron que, los índices espectrales como NDVI y EVI permiten evaluar de manera no

destruccion el estado fisiológico del camu camu, facilitando la toma de decisiones agronómicas para mejorar su productividad.

La presente investigación buscó la determinación de los índices espectrales en los diferentes estados fenológicos en el cultivo de camu camu (*Myrciaria dubia* HBK) en Yarinacocha.

Tabla 1.

Georeferenciación de los puntos de evaluación en los sectores de San Juan, San José y San Lorenzo, en Yarinacocha.

Sector	S	W	Altura
San Juan	8°19'24''	74°35'57''	143 m
San José	8°20'07''	74°36'08''	144 m
Puente San Lorenzo	8°20'52''	74°35'49''	145 m

Materiales y métodos

Ubicación de los sectores evaluados

La investigación se desarrolló en los sectores de San Juan, San José y el puente de San Lorenzo, ubicados en el distrito de Yarinacocha, Provincia de Coronel Portillo, Región Ucayali (tabla 1).

Preparación del vehículo aéreo no tripulado (RPAS) y la cámara multiespectral

Se procedió a preparar el dron DJ modelo Matrice 600 Pro, el cual se le incorporó una cámara Parrot Sequoia de 5 cámaras, las cuales, la primera cámara fue la RGB (16 Mpix), la segunda cámara fue el sensor Verde (1,2 Mpix), la tercera cámara fue el sensor Rojo (1,2 Mpix), la cuarta cámara fue el sensor Borde rojo (1,2 Mpix) y la quinta cámara fue el sensor Infrarrojo cercano (1,2 Mpix).

Plan de vuelo

Se realizó la programación del plan de vuelo utilizando el software DJI GO y DJI GS Pro, programando las siguientes variables: Altura de vuelo (30 metros), Velocidad (5 m/s), Traslape (85 %), Tiempo estimado de vuelo (25 minutos). Se realizó la programación del vuelo del dron tomando como unidad de área, una hectárea de camu camu.

Captura de imágenes y procesamiento de datos

Las capturas de imágenes a través de la cámara multiespectral fueron procesadas en el software QGIS V 3.28.8 y Metashape V 2.0.2, para elaborar el mapa correspondiente y determinar el modelamiento topográfico y los índices multiespectrales (NDVI) en los estados fenológicos de crecimiento o brotamiento y floración del cultivo de camu camu.

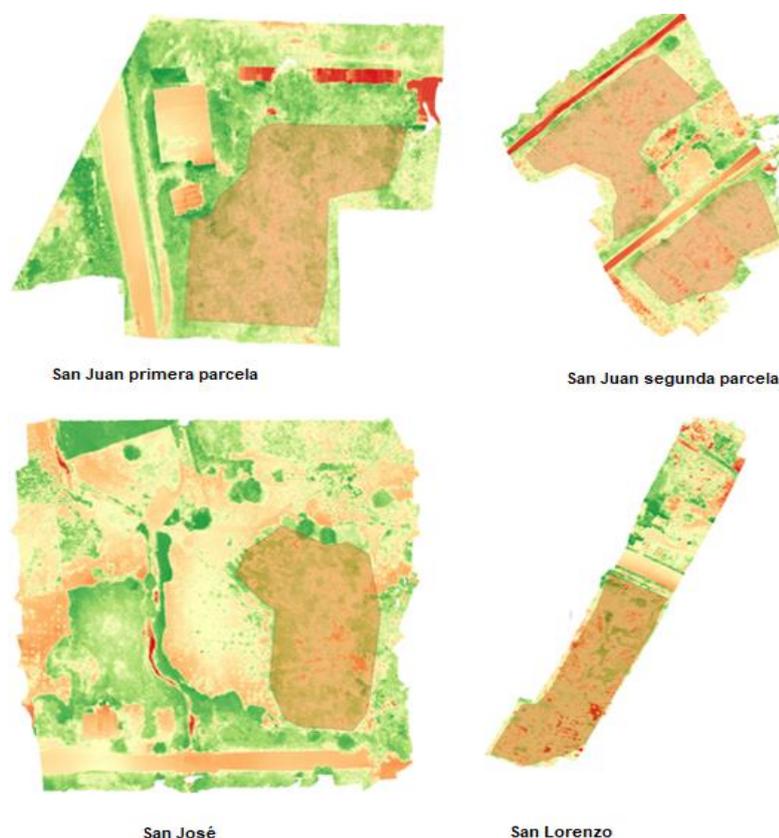
Resultados y discusión

*Eficiencia del uso de imágenes aéreas en el modelamiento topográfico del cultivo de camu camu (*Myrciaria dubia* HBK).*

La tabla 2 muestra el modelamiento topográfico de las áreas evaluadas en los sectores de San Juan, San José y San Lorenzo, en Yarinacocha, después de obtener las imágenes espectrales y elaborar los mapas para el modelamiento topográfico de las plantas de camu camu que se muestran en la figura 1.

Figura 1

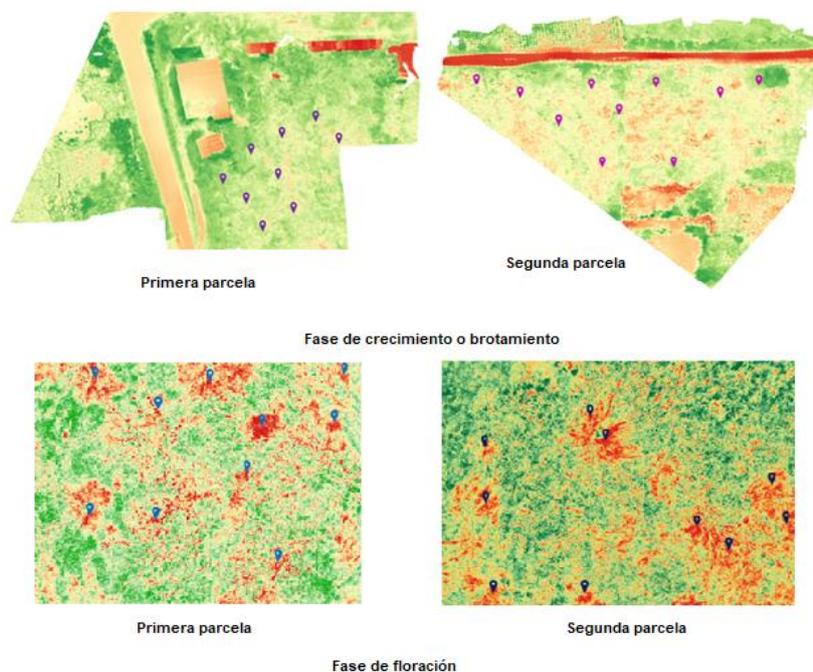
Mapa obtenido de la captura de imágenes espectrales y la selección del área para el modelamiento topográfico en los sectores de San Juan, San José y San Lorenzo.



La tabla 2 muestra los resultados de las áreas de cultivo de camu camu efectivas, calculadas mediante la utilización de las imágenes multiespectrales, en metros cuadrados y en hectáreas. Al respecto, Oliveira et al. (2022) combinaron bandas espectrales con índices topográficos como TWI y TPI, utilizando algoritmos de aprendizaje automático para predecir el rendimiento del maíz.

Figura 2

Mapa obtenido de la captura de imágenes espectrales en la primera y segunda parcela, en la fase de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector de San Juan.



La integración de estos datos mejoró notablemente la precisión de las predicciones, especialmente en zonas de manejo específicas. Yu et al. (2021) emplearon imágenes multiespectrales de drones, métricas topográficas y propiedades del suelo para estimar el peso de nitrógeno en el dosel del maíz. Utilizando modelos de Random Forest y regresión por vectores de soporte, concluyeron que las variables topográficas mejoraron la precisión de las estimaciones. Di Tommaso et al. (2021) combinaron datos de GEDI y Sentinel-2 para mapear cultivos altos y bajos, demostrando que los perfiles de energía de GEDI permiten diferenciar con precisión cultivos como el maíz, mejorando el mapeo en áreas con pocas etiquetas de entrenamiento. Matese et al. (2020) usaron imágenes multiespectrales de drones para generar modelos digitales de superficie y terreno en viñedos, lo que permitió estimar la altura del dosel de las vides y obtener información útil sobre la arquitectura del cultivo para mejorar la gestión de la producción, siendo estas afirmaciones coincidentes con los resultados obtenidos en el presente estudio, en el cual se puede aplicar las imágenes aéreas, en el cálculo del área de cultivo.

Tabla 2.

Modelamiento topográfico de las áreas evaluadas en los sectores de San Juan, San José y San Lorenzo, en Yarinacocha.

Descripción	Área (m ²)	ha
San Juan: Primera Parcela	1719.6	0.172
San Juan: Segunda Parcela	7655.4	0.766
	5357.9	0.536
San José	4211.9	0.421
San Lorenzo	6887.6	0.689

Eficiencia del uso de imágenes aéreas en la determinación de los estados fenológicos del cultivo de camu camu (Myrciaria dubia HBK).

Estado fenológico de crecimiento o brotamiento y floración del sector San Juan.

La figura 2 muestra el mapa elaborado a partir de la captura de las imágenes multiespectrales correspondientes a dos parcelas en el sector de San Juan, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración.

La tabla 3 y 4 muestra los valores de NDVI correspondientes a 10 plantas de camu camu seleccionadas al azar, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración, de dos parcelas en el sector de San Juan.

Tabla 3.

Valores de NDVI obtenidos de 10 plantas seleccionadas al azar en la primera y segunda parcela, en la fase de crecimiento o brotamiento, en el sector de San Juan.

N°	Primera Parcela			Segunda Parcela				
	NDVI	Valores		NDVI	Valores			
		Valor	Color	Etiqueta		Valor	Color	Etiqueta
1	0.417				0.426			
2	0.379	-0.5796635		-0.5797	0.328	-0.3188913		-0.3189
3	0.024				0.528			
4	0.431	-0.2252381		-0.2252	0.504	-0.0182377		-0.0182
5	0.619				0.295			
6	0.454	0.1291873		0.1292	0.166	0.2824158		0.2824
7	0.150				0.415			
8	0.350	0.4836126		0.4836	0.339	0.5830694		0.5831
9	0.153				0.314			
10	0.541	0.838038		0.8380	0.436	0.8837229		0.8837

La tabla 3 muestra el valor del NDVI para 10 plantas tomadas al azar en el área evaluada, en la fase de crecimiento o brotamiento, mostrándose que en la primera parcela los valores de NDVI están en rangos de 0.619 a 0.150, y de acuerdo a los valores, se encuentra entre mediano y bajo,

asimismo para la segunda parcela, los valores de NDVI están en rangos de 0.528 a 0.166, y de acuerdo a los valores, se encuentra entre mediano y bajo.

Tabla 4.

Valores de NDVI obtenidos de 10 plantas seleccionadas al azar en la primera y segunda parcela, en la fase de floración, en el sector de San Juan.

N°	Primera Parcela			Segunda Parcela				
	NDVI	Valores		NDVI	Valores			
1	-0.450	Valor	Color	Etiqueta	-0.512	Valor	Color	Etiqueta
2	-0.46	-0.4110343		-0.4110	-0.453	-0.3730397		-0.3730
3	-0.150	-0.1986746		-0.1987	-0.494	-0.1581771		-0.1582
4	-0.556	0.0136851		0.0137	-0.372	0.0566856		0.0567
5	-0.342	0.2260448		0.2260	-0.534	0.2715482		0.2715
6	-0.334	0.4384045		0.4384	-0.478	0.4864109		0.4864
7	-0.407				-0.478			
8	-0.503				-0.363			
9	-0.383				-0.396			
10	-0.204				-0.390			

La tabla 4 muestra el valor del NDVI para 10 plantas tomadas al azar en el área evaluada, en la fase de floración, mostrándose que en la primera parcela los valores de NDVI están en rangos de -0.556 a -0.150, y de acuerdo a los valores, se encuentra muy bajo, asimismo para la segunda parcela, los valores de NDVI están en rangos de -0.534 a -0.363, y de acuerdo a los valores, se encuentra muy bajo.

La tabla 5 muestra los índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI de la primera y segunda parcela del, en la fase de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector de San Juan. Así, como el análisis estadístico de los índices de tendencia central y dispersión de los valores de NDVI en la fase fenológica de crecimiento o brotamiento, obtenidos en la primera parcela del sector de San Juan, observándose que, el valor medio de NDVI fue de 0.374 y una desviación estándar de 0.155, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue medianamente abundante. Asimismo, en la segunda parcela del sector de San Juan, se observó que el valor medio de NDVI fue de 0.375 y una desviación estándar de 0.108, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue medianamente abundante.

Asimismo, muestra el análisis estadístico de los índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI en la fase fenológica de floración, obtenidos en la primera parcela del sector San Juan, observándose que, el valor medio de NDVI fue de -0.379 y una desviación estándar de 0.127, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue muy bajo. Asimismo, en la segunda

parcela del sector San Juan, se observó que, el valor medio de NDVI fue de -0,363 y una desviación estándar de 0.060, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue muy bajo.

Tabla 5.

Índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI de la primera y segunda parcela del, en la fase de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector de San Juan.

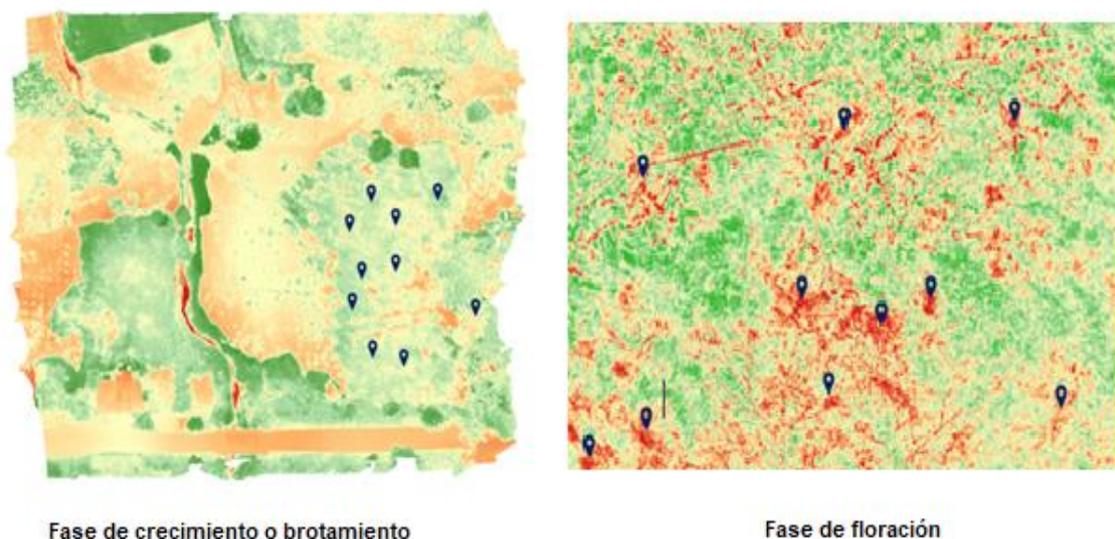
Fase fenológica	Parcela	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza	
Crecimiento o brotamiento	1	NDVI	10	0.1501	0.6197	0.3741 47	0.1550319	0.024
		N válido (según lista)	10					
	2	NDVI2	10	0.1667	0.5285	0.37570 8	0.1081341	0.012
		N válido (según lista)	10					
Floración	1	NDVI1	10	-0.5562	-0.1505	0.37976 7	0.1274909	0.016
		N válido (según lista)	10					
	2	NDVI2	10	-0.5343	-0.3635	0.44422 3	0.0608121	0.004
		N válido (según lista)	10					

Sector San José

La figura 3 muestra el mapa elaborado a partir de la captura de las imágenes multiespectrales correspondientes al sector de San José, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración.

Figura 3

Mapa obtenido de la captura de imágenes espectrales, en la fase de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector de San José.



En la tabla 6 muestra los valores de NDVI correspondientes a 10 plantas de camu camu seleccionadas al azar, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector de San José.

Tabla 6.

Valores de NDVI obtenidos de 10 plantas seleccionadas al azar, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector de San José.

N°	Fase de crecimiento o brotamiento			Fase de floración				
	NDVI	Valores		NDVI	Valores			
		Valor	Color	Etiqueta		Valor	Color	Etiqueta
1	0.450				-0.330			
2	0.390	-0.4944189		-0.4944	-0.407	-0.3832226		-0.3832
3	0.298				-0.329			
4	0.293	-0.1497065		-0.1497	-0.413	-0.1718442		-0.1718
5	0.342				-0.461			
6	0.254	0.1950059		0.1950	-0.401	0.0395343		0.0395
7	0.428				-0.383			
8	0.374	0.5397183		0.5397	-0.466	0.2509128		0.2509
9	0.342				-0.404			
10	0.307	0.8844306		0.8844	-0.257	0.4622912		0.4623

La tabla 6 muestra el valor del NDVI para 10 plantas tomadas al azar en el área evaluada, en la fase de crecimiento o brotamiento, mostrándose que los valores de NDVI está en rangos de 0.450 a 0.293, y de acuerdo a los valores, se encuentra en rango mediano. El valor del NDVI para 10 plantas tomadas al azar en el área evaluada, en la fase de floración, están en rangos de -0.466 a -0.257, y de acuerdo a los valores, se encuentra muy bajo.

La tabla 7 muestra los índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI en el sector de San José, en la fase de crecimiento o brotamiento y floración.

Tabla 7.

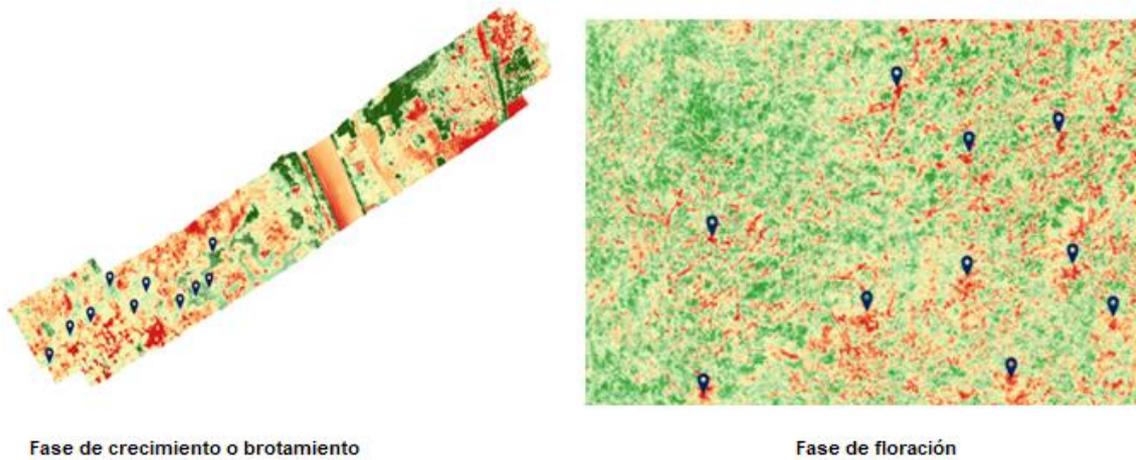
Índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración del sector San José.

Fase fenológica		N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza
Crecimiento o brotamiento	NDVI3	10	0.25421	0.45081	0.3482826	0.0628502	0.004
	N válido (según lista)	10					
Floración	NDVI3	10	-0.46678	-0.25731	-0.3856045	0.0640320	0.004
	N válido (según lista)	10					

La tabla 7 muestra el análisis estadístico de los índices de tendencia central y dispersión de los valores de NDVI obtenidos en el sector de San José, observándose que, en la fase fenológica de crecimiento o brotamiento el valor medio de NDVI fue de 0,3482826 y una desviación estándar de 0,0628502, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue medianamente abundante. Asimismo, el análisis estadístico de los índices de tendencia central y dispersión de los valores de NDVI obtenidos en el sector San José, se observa que, en la fase fenológica de floración, el valor medio de NDVI fue de -0.3856045 y una desviación estándar de 0.0640320, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue muy bajo.

Figura 4

Mapa obtenido de la captura de imágenes espectrales, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector del Puente San Lorenzo.



Puente San Lorenzo

La figura 4 muestra el mapa elaborado a partir de la captura de las imágenes multiespectrales correspondientes al sector de San Lorenzo, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración.

Tabla 8.

Valores de NDVI obtenidos de 10 plantas seleccionadas al azar, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector del Puente San Lorenzo.

N°	Fase de crecimiento o brotamiento		Fase de floración	
	NDVI	Valores	NDVI	Valores
1	0.443		-0.437	
2	0.333		-0.473	
3	0.344		-0.166	
4	0.285		-0.446	



5	0.234	Valor	Color	Etiqueta	-0.342	Valor	Color	Etiqueta
6	0.307	-0.0187826		-0.0188	-0.053	-0.3790433		-0.3790
7	0.394	0.1317942		0.1318	-0.351	-0.1660548		-0.1661
8	0.428	0.2823711		0.2824	-0.125	0.0469338		0.0469
9	0.275	0.4329479		0.4329	-0.464	0.2599224		0.2599
10	0.464	0.5835248		0.5835	-0.406	0.4729109		0.4729

En la tabla 8 muestra los valores de NDVI correspondientes a 10 plantas de camu camu seleccionadas al azar, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración, en el sector de San Lorenzo.

La tabla 8 muestra el valor del NDVI para 10 plantas tomadas al azar en el área evaluada, en la fase de crecimiento o brotamiento, mostrándose que los valores de NDVI está en rangos de 0.464 a 0.275, y de acuerdo a los valores, se encuentra en rango mediano a bajo. El valor del NDVI para 10 plantas tomadas al azar en el área evaluada, en la fase de floración, están en rangos de -0.473 a -0.053, y de acuerdo a los valores, se encuentra muy bajo.

La tabla 9 muestra los índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI en el sector de San Lorenzo, en la fase de crecimiento o brotamiento y floración.

Tabla 9.

Índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI, en las fases de crecimiento o brotamiento y floración, del sector del Puente San Lorenzo.

Fase fenológica	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza
Crecimiento o brotamiento	NDVI4	10	0.23432	0.46478	0.351143	0.0783882
	N válido (según lista)	10				0.006
Floración	NDVI4	10	-0.53272	-0.12594	-0.374749	0.1331050
	N válido (según lista)	10				0.018

La tabla 9 muestra el análisis estadístico de los índices de tendencia centra y dispersión de los valores de NDVI obtenidos en el sector del Puente San Lorenzo, observándose que, en la fase fenológica de crecimiento o brotamiento el valor medio de NDVI fue de 0,351143 y una desviación estándar de 0,0783882, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue medianamente abundante. Asimismo, en la fase fenológica de floración, el valor medio de NDVI

fue de $-0,374749$ y una desviación estándar de $0,1331050$, por consiguiente, el índice de Vegetación (NDVI) fue muy bajo. Al respecto, Guo et al. (2021) desarrollaron un índice que combina información espectral y textural derivada de imágenes ópticas obtenidas por drones para monitorear el crecimiento de perales. Este enfoque permitió detectar cambios dinámicos en las condiciones de crecimiento de los árboles, considerando variables climáticas y propiedades del suelo. Silva et al. (2022), en Brasil, emplearon imágenes RGB capturadas por drones para evaluar atributos biométricos en huertos de cítricos en formación. Se desarrolló una rutina automatizada que permitió estimar con alta precisión la proyección de la copa y la altura de las plantas, demostrando la utilidad de las imágenes aéreas en la gestión de cultivos perennes. Martínez et al. (2017) integraron imágenes multiespectrales aéreas y sensores de conductividad eléctrica aparente del suelo para detectar variabilidad espacial en un huerto de duraznos. Los resultados permitieron delinear zonas de manejo específicas para mejorar la capacidad de retención de agua del suelo y regular el vigor de los árboles. Zhang et al. (2023), en la región de Zhaotong, China, aplicaron un método mejorado de características de ángulo espectral combinado con imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 para identificar huertos de manzanas en terrenos complejos. El enfoque mejoró significativamente la precisión de clasificación, demostrando la eficacia de integrar datos espectrales y topográficos en la identificación de cultivos frutales. Salazar et al. (2023) utilizaron imágenes RGB capturadas por drones para calcular índices de vegetación, como el NDVI y el MGRVI, con el fin de diferenciar el estado nutricional y hídrico en plantaciones de aguacate Hass. Los resultados mostraron una alta correlación entre estos índices y los niveles de nitrógeno foliar, destacando el potencial de estas herramientas en la agricultura de precisión. Zhao et al. (2015) emplearon imágenes hiperespectrales para estimar y visualizar el contenido de nitrógeno en la canopia de árboles cítricos utilizando el TBVI. Los resultados indicaron que este índice permite una detección no destructiva y en tiempo real del estado nutricional, facilitando la implementación de esquemas de fertilización individualizados. Zarco et al. (2015) monitorearon huertos de perales durante tres temporadas utilizando sensores hiperespectrales. Encontraron que índices como el NDWI, PRI y ReNDVI se correlacionaron significativamente con variables de rendimiento y calidad del fruto, como la firmeza y los sólidos solubles totales, resaltando la importancia de la selección temporal de los índices para una estimación precisa. Peña et al. (2017) evaluaron el uso de índices espectrotemporales derivados de series temporales de imágenes satelitales para mejorar la clasificación de cultivos frutales en el Valle de Aconcagua, Chile. La integración de múltiples índices de diferencia normalizada (NDIs) mejoró la precisión de clasificación, demostrando la utilidad de estos índices en la identificación de diferentes tipos de frutales. Li et al. (2024)

evaluaron el uso de múltiples índices de vegetación, como NDVI, LSWI y NDPI, para identificar etapas fenológicas del maíz mediante un modelo de forma (SMF). Los resultados indicaron que la combinación de diferentes índices mejora la precisión en la identificación de etapas como emergencia, floración y madurez. da Silva et al. (2024) evaluaron la eficiencia de diferentes índices de vegetación obtenidos de imágenes satelitales con distintas resoluciones espaciales para discriminar etapas fenológicas de la soja. Los resultados demostraron que, aunque ningún índice fue 100% efectivo en todas las etapas, ciertos índices específicos pueden identificar etapas clave como floración y madurez fisiológica. Tariq et al. (2017) evaluaron diversos índices de vegetación hiperespectrales para estimar el índice de área foliar (LAI) en diferentes etapas fenológicas del arroz. Se encontró que el índice de vegetación de razón (RVI) mostró la mayor correlación con el LAI durante la etapa de elongación, seguido por NDVI y GNDVI. Amoah & Asante (2023), en Ghana, utilizaron datos del satélite Sentinel-2 para derivar índices de vegetación como EVI y NDVI, con el objetivo de identificar etapas fenológicas del mango. Los resultados mostraron que estos índices pueden capturar eficazmente las etapas de floración, desarrollo del fruto y madurez., siendo estas investigaciones concordantes con los resultados obtenidos en el presente estudio, se corrobora que, el uso de imágenes multiespectrales y los índices de vegetación, pueden ser empleados para identificación de las fases fenológicas en el cultivo del camu camu.

Conclusiones

La utilización de imágenes espectrales para la elaboración de mapas ha demostrado ser una herramienta eficaz en el modelamiento topográfico de las plantaciones de camu camu. Esta metodología permite no solo identificar con precisión la distribución espacial de las plantas, sino también determinar el área efectiva ocupada por la plantación, lo que contribuye significativamente a una mejor planificación y manejo agrícola.

Los resultados obtenidos evidencian que los índices de vegetación, en particular el NDVI, varían significativamente según el estado fenológico del cultivo de camu camu. Durante la fase de brotamiento, los valores moderadamente altos del NDVI (0,34 a 0,37) reflejan una mayor actividad fotosintética y densidad de follaje, mientras que, en la fase de floración, la notable disminución del NDVI a valores negativos (-0,44 a -0,37) indica una reducción sustancial en la cobertura vegetal activa. Esta variabilidad confirma la utilidad del NDVI como indicador sensible para monitorear el desarrollo fenológico del camu camu.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de Ucayali y al Vicerrectorado de Investigación, por financiar el proyecto de investigación titulado “Modelamiento topográfico y determinación de los estados fenológicos del cultivo de camu camu (*Myrciaria dubia* HBK), a través de imágenes aéreas en cuatro sectores productivos del distrito de Yarinacocha”, con Resolución No 990-2022-UNU-CU-R.

Referencia bibliográfica

- Amoah, A. A., & Asante, W. A. (2023). Assessing the Potential of Sentinel-2 Derived Vegetation Indices to Retrieve Phenological Stages of Mango in Ghana. *Horticulturae*, 8(1), 11. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010011>
- Dávila, J. C., & Delgado, A. M. (2021). Aplicación de sensores remotos para el monitoreo de cultivos de camu camu (*Myrciaria dubia*) en sistemas de producción amazónicos. *Revista Científica Amazónica*, 9(1), 25–34. <https://doi.org/10.32745/rca.v9n1.2021.120>
- da Silva, A. A., dos Santos Silva, F. C., Guimarães, C. M., Saleh, I. A., da Cruz Neto, J. F., El-Tayeb, M. A., Abdel-Maksoud, M. A., González Aguilera, J., AbdElgawad, H., & Zuffo, A. M. (2024). Spectral indices with different spatial resolutions in recognizing soybean phenology. *PLoS ONE*, 19(9), e0305610. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305610>
- Di Tommaso, S., Wang, S., & Lobell, D. B. (2021). Combining GEDI and Sentinel-2 for wall-to-wall mapping of tall and short crops. arXiv preprint arXiv:2109.06972. [https://arxiv.org/abs/2109.06972​;contentReference\[oaicite:12\]{index=12}](https://arxiv.org/abs/2109.06972​;contentReference[oaicite:12]{index=12}) n
- Faria, J. E. Q., Rocha, A. P., Souza, C. R. F., Oliveira, W. P., & Oliveira, E. G. (2011). Camu-camu (*Myrciaria dubia*): A bioactive-rich Amazonian fruit with functional attributes. *Food Research International*, 44(9), 2545–2553. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.047>
- Franco, M. R. B., Costa, A. G. V., Silva, L. H. M., & Fai, A. E. C. (2020). Camu-camu (*Myrciaria dubia*): Chemistry and functional properties: A review. *Food Research International*, 137, 109751. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109751>
- Fiorio, P. R., & Demattê, J. A. M. (2021). Spectral vegetation indices: Performance in the agricultural landscape. *Scientia Agricola*, 78(1), e20190211. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0211>
- Guo, Y., Chen, S., Wu, Z., Wang, S., Bryant, C. R., Senthilnath, J., Cunha, M., & Fu, Y. H. (2021). Integrating spectral and textural information for monitoring the growth of pear trees using optical images from the UAV platform. *Remote Sensing*, 13(9), 1795. <https://doi.org/10.3390/rs13091795>

- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., & van Leeuwen, W. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 440–451. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Li, Y., Zhang, X., Wang, Y., & Liu, Y. (2024). Combining Vegetation Indices to Identify the Maize Phenological Information Based on the Shape Model. *Agriculture*, 14(9), 1608. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091608>
- Martínez-Casasnovas, J. A., Daniele, E., Uribeetxebarria, A., Escolà, A., Rosell-Polo, J. R., Sartori, L., & Arnó, J. (2017). Combined use of remote sensing and soil sensors to detect variability in orchards with previous changes in land use and landforms: consequences for management. *Advances in Animal Biosciences*, 8(2), 755–759. <https://doi.org/10.1017/S2040470017000920>
- Matese, A., Di Gennaro, S. F., & Primicerio, J. (2020). Phenotypic techniques and applications in fruit trees: a review. *Plant Methods*, 16(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00649-7>
- Navarro Herrera, M. F., López Granados, F., & Peña, J. M. (2020). Remote sensing and spectral vegetation indices for precision agriculture: Applications and trends. *Agronomy*, 10(7), 1045. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071045>
- Oliveira, M. F. de, Ortiz, B. V., Morata, G. T., Jiménez, A.-F., Rolim, G. de S., & Silva, R. P. de. (2022). Training machine learning algorithms using remote sensing and topographic indices for corn yield prediction. *Remote Sensing*, 14(23), 6171. <https://doi.org/10.3390/rs14236171>
- Peña, M. A., Liao, R., & Brenning, A. (2017). Using spectrottemporal indices to improve the fruit-tree crop classification accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 57, 84–94. [https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.012​:contentReference\[oaicite:14\]{index=14}](https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.012​:contentReference[oaicite:14]{index=14})

- Pinedo, M., Vásquez, W., & Rojas, R. (2004). Fenología y producción de frutos de camu camu (*Myrciaria dubia* (H.B.K.) McVaugh) en el banco de germoplasma de INIA - Loreto. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Perú.
- Ríos, J., García, L., & Paredes, M. (2021). Aplicación de sensores remotos e índices espectrales en el monitoreo del camu camu (*Myrciaria dubia*) en zonas inundables de la Amazonía peruana. *Revista de Agricultura Amazónica*, 10(1), 22–30. <https://doi.org/10.37787/raa.v10i1.234>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication, 351, 309.
- Salazar-Reque, I., Arteaga, D., Mendoza, F., Rojas, M. E., Soto, J., Huaman, S., & Kemper, G. (2023). Differentiating nutritional and water statuses in Hass avocado plantations through a temporal analysis of vegetation indices computed from aerial RGB images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108246. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108246> & #8203;:contentReference[oaicite:2]{index=2}
- Silva, J. R. M., Teodoro, P. E., Teodoro, L. P. R., & Farias, P. R. S. (2022). Citrus orchards under formation evaluated by UAV-based RGB imagery. *Scientia Agricola*, 79(5), e20210052. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0052>
- Tariq, A., Wang, H., & Zhang, Y. (2017). Evaluating Hyperspectral Vegetation Indices for Leaf Area Index Estimation of *Oryza sativa* L. at Diverse Phenological Stages. *Frontiers in Plant Science*, 8, 820. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00820>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, Article ID 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yu, J., Wang, J., & Leblon, B. (2021). Evaluation of soil properties, topographic metrics, plant height, and unmanned aerial vehicle multispectral imagery using machine learning methods to estimate canopy nitrogen weight in corn. *Agricultural Sciences*. Recuperado de [https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de4b740f3e94b9e5cd237b​:contentReference\[oaicite:10\]{index=10}](https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de4b740f3e94b9e5cd237b​:contentReference[oaicite:10]{index=10})
- Zhang, Y., Li, X., Wang, J., & Liu, Y. (2023). A study of apple orchards extraction in the Zhaotong region based on Sentinel images and improved spectral angle features. *Applied Sciences*, 13(20), 11194. <https://doi.org/10.3390/app132011194>



- Zhao, Y., Liu, Y., & Wang, J. (2015). Estimation and visualization of nitrogen content in citrus canopy based on two band vegetation index (TBVI). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 1009–1016. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.07.074>
- Zarco Tejada, P. J., Hubbard, N., & Loudjani, P. (2014). Precision agriculture: An opportunity for EU farmers – Potential support with the CAP 2014–2020. European Union. <https://doi.org/10.2791/80497>
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. J. (2015). Temporal dependency of yield and quality estimation through spectral vegetation indices in pear orchards. *Remote Sensing*, 7(8), 9886–9905. <https://doi.org/10.3390/rs70809886>

