



DOI: [10.29298/rmcf.v15i82.1431](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i82.1431)

Artículo de investigación

Diurnal Change of *NDVI* from UAV in trees of a temperate unavenged forest stand

Cambio diurno de *NDVI* a partir de VANT en árboles de un rodal incoetáneo de un bosque templado

Marín Pompa-García^{1*}, José Ángel Sigala-Rodríguez², Eduardo Daniel Vivar-Vivar¹, Felipa de Jesús Rodríguez-Flores³, Joel Rascón-Solano⁴

Fecha de recepción/Reception date: 31 de agosto de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 10 de enero de 2024.

¹Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

²Campo Experimental Valle del Guadiana, INIFAP. México.

³Ingeniería en Tecnología Ambiental, Universidad Politécnica de Durango. México.

⁴Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad Autónoma de Chihuahua. México.

*Corresponding author: e-mail: mpgarcia@ujed.mx

*Autor para correspondencia: correo-e: mpgarcia@ujed.mx

Resumen

El *NDVI* dilucida los mecanismos ecofisiológicos a los que se enfrenta la vegetación. Gracias a la flexibilidad y versatilidad de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), las resoluciones temporales, espaciales y espectrales han sido útiles para apoyar la toma de decisiones. En este trabajo se modelizó el cambio diurno en el *NDVI* derivado de imágenes de VANT para árboles individuales en un rodal forestal natural incoetáneo. Se realizaron ocho vuelos durante las horas diurnas a lo largo de un día para evaluar la dinámica del *NDVI* de los géneros *Pinus*, *Juniperus* y *Quercus*. Los resultados mostraron valores de *NDVI* inestables en el tiempo, con una tendencia cuadrática parabólica en el modelo. El *NDVI* alcanzó su máximo alrededor de las 13:00 h y los valores difirieron significativamente según el género: el valor más alto se encontró en *Pinus* con diferencias significativas presentadas con *Juniperus* y *Quercus*, que mostraron valores similares entre ellos ($p=0.533$). Como estrategia de validación, probamos el modelo generado utilizando 124 árboles independientes de los muestreados, lo que reforzó nuestros resultados en términos de confiabilidad. Las similitudes de los parámetros estadísticos confieren una alta variabilidad de aplicación de los resultados en modelos de simulación de ecosistemas forestales similares. Recomendamos estudiar más índices espectrales de vegetación, incluyendo la calibración del sensor, particularmente en estudios estacionales de más largo plazo. Concluimos que el *NDVI* medido mediante VANT debe considerar el tiempo de adquisición de la imagen para calibrar los registros y así mejorar la interpretación de los resultados.

Palabras clave: Drones, índice de vegetación, árboles individuales, índices espectrales, edad desigual, vigor.

Abstract

NDVI elucidates the ecophysiological mechanisms faced by vegetation. With the flexibility and versatility of unmanned aerial vehicles (UAVs), temporal, spatial and spectral resolutions have been useful in supporting decision-making. Here, we modeled diurnal change in the *NDVI* derived from UAV imagery for individual trees in a natural forest stand. Eight flights were conducted during daylight hours over one day to assess the dynamics of the *NDVI* of the genera *Pinus*, *Juniperus*, and *Quercus*. The results showed unstable *NDVI* values over time,

with a parabolic quadratic trend in the model. The *NDVI* reached its maximum around 13:00 h and the values differed significantly according to genus: the highest value was found in *Pinus* with significant differences presented with *Juniperus* and *Quercus*, which showed similar values between them ($p=0.533$). As a validation strategy, we test the model generated using 124 trees independent of those that were sampled, which strengthened our results in terms of reliability. The similarities of statistical parameters confer a high variability of application of the results in models of simulation of similar forests ecosystems. We recommend to study more spectral indices of vegetation, including calibration of the sensor, particularly in longer-term seasonal studies. We conclude that the *NDVI* measured using UAV should consider image acquisition time to calibrate the records and thus improve the interpretation of results.

Key words: Drones, index vegetation, individual trees, spectral indices, uneven aged, vigor.

Introducción

Los últimos avances en la agenda internacional muestran que la información obtenida por medio de VANT ofrece hallazgos prometedores que evidencian mecanismos ecológicos novedosos (Dronova y Taddeo, 2022). Por ejemplo, los índices espectrales de la vegetación contienen información valiosa que normalmente el ojo humano no percibe a simple vista. Uno de los índices de vegetación más utilizado por la comunidad científica internacional es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) (Huang *et al.*, 2021), el cual se refiere al índice de verdor de la vegetación. Su cálculo se basa en la razón entre las longitudes de onda del infrarrojo y las del infrarrojo cercano. Asimismo, el infrarrojo cercano depende de la cantidad de luminosidad que se transforma en la reflectancia diferencial de la energía recibida, y está influida por las sombras y la información de píxeles mixtos suelo-planta, etcétera. (Huang *et al.*, 2021; Buchhart y Schmidhalter, 2022). Esto implica que la cantidad de luz recibida por la cubierta vegetal a lo largo del tiempo depende de diversos factores, como el momento de la captura de la imagen (Li *et al.*, 2020), la heterogeneidad del follaje, y la disposición del dosel (Fawcett *et al.*, 2021); en consecuencia, el *NDVI* puede variar. Por ello, se debe investigar su variación temporal en los bosques a fin de mejorar la interpretación de los resultados en materia de reflectancia (Beneduzzi *et al.*, 2017).

Normalmente, sus valores proceden de sensores instalados en satélites que cubren grandes zonas a escala regional (imprecisa (>10 m)) (Huang *et al.*, 2021), y que

son escasos a nivel de árboles individuales como unidades ecológicas (Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020).

Los estudios más importantes sobre el uso del *NDVI* obtenido mediante un VANT recomiendan capturar las imágenes al mediodía, al menos en el sector agrícola (Maresma *et al.*, 2020; Hama *et al.*, 2021), pero los datos cuantitativos sobre su dinámica y sus parámetros comparativos en la vegetación arbórea son limitados. Por lo tanto, el conocimiento de estos parámetros respaldaría los resultados de los índices de verdor y mejoraría la interpretación de los resultados de las estrategias de gestión forestal. Esta comprensión es crucial dada la variabilidad climática adversa a la que se enfrentan actualmente los ecosistemas terrestres (Právělie *et al.*, 2022).

La presencia de especies mixtas en las masas forestales naturales representa un laboratorio ideal para comprobar la variabilidad del *NDVI* a nivel de árboles. La diversidad de las especies en parcelas bajo gestión es ideal para realizar ese tipo de estudios. Además, los drones tienen una gran versatilidad para configurar sus misiones, según los intereses de los usuarios. Por ejemplo, si el acceso a los lugares de interés o las condiciones meteorológicas limitan la adquisición de imágenes a la hora deseada, el usuario puede ejecutar las misiones cuando las condiciones lo permitan, ajustando los parámetros del modelo a la hora requerida.

En el norte de México, existe un área experimental de bosque incoetáneo bajo manejo con presencia de *Pinus engelmannii* Carrière, *Quercus grisea* Liebm., *Arbutus bicolor* S. González, M. González & P. D. Sørensen y *Juniperus deppeana* Steud. de gran importancia ecológica, lo que la hace ideal para realizar experimentos que amplíen el conocimiento sobre la dinámica espacial y temporal del *NDVI* (Vivar-Vivar *et al.*, 2022). Además, es una zona que también proporciona bienes y servicios a las comunidades circundantes, la mayoría de las cuales son indígenas, y constituye un refugio para diversas especies de fauna silvestre.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue modelar la variación diurna de los valores de reflectancia en una masa forestal mixta del norte de México. La hipótesis

fue que existe un valor de reflectancia inestable en el tiempo, tiene una implicación potencial en la hora de captura de las imágenes para calibrar los registros, y así mejorar la interpretación de los valores de *NDVI*.

Materiales y Métodos

Se utilizó una parcela de 1 ha localizada en la Sierra Madre Occidental (27°80'57" N, 107°60'41" O; 2 400 msnm), donde coexisten especies de los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus* (Cuadro 1). La especie dominante es *P. engelmannii*, seguida de *Q. grisea* y *J. deppeana*, con escasa presencia de *A. bicolor*. En el estrato arbustivo predominan los individuos de *Ceanothus buxifolius* Willd. ex Schult. f., y en el estrato herbáceo hay una gran diversidad de plantas, aunque se caracteriza por la presencia de *Bouvardia ternifolia* (Cav.) Schldl., *Houstonia rubra* Cav., *Eryngium heterophyllum* Engelm., *Dysphania graveolens* Mosyakin & Clemants, *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths, *Cyperus esculentus* L., entre otras (González-Elizondo *et al.*, 2012). Esta zona presenta una pendiente suave y es poco pedregosa; los bosques están sujetos a manejo forestal comercial para la obtención de madera (González-Elizondo *et al.*, 2012). Los suelos del área de estudio son de tipo Cambisol con finas capas de materia orgánica; el clima corresponde al templado, con una temperatura media anual de 13.7 °C, temperatura mínima de -15 °C y hay precipitaciones muy variables que oscilan entre 470 y 683 mm al año, con una precipitación media anual de 540.4 mm y un promedio de 75 días de lluvia al año (Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020).

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de los árboles muestreados en la zona de estudio.

Estadístico	DB						DAP						AC						AT					
	Pinus		Juniperus		Quercus		Pinus		Juniperus		Quercus		Pinus		Juniperus		Quercus		Pinus		Juniperus		Quercus	
	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*	+	*
Media	34.9	15.1	18.4	10.4	45.2	16.6	28.6	11.2	13.3	7.2	35.9	11.5	6.6	2.9	2.1	1.8	3.1	1.9	13.9	6.7	5.2	3.6	12.2	6.5
Desviación estándar	9.3	3.9	4.4	3.1	10.7	5.8	8.1	3.2	3.7	2.4	9.7	5.0	3.1	0.8	0.3	0.3	1.6	0.7	2.9	1.5	1.1	0.8	1.9	2.3
Rango	45.6	17.3	18.8	10.7	41.8	18.6	40.4	13.5	14	8	41.6	18.8	10.1	5.1	1.4	1.2	8.5	3.1	13.8	74.8	4.9	3.4	8.6	8
Mín	20.8	9.7	13.6	5.3	26.8	6.3	16	6.4	11	3.5	20.7	3.5	2.5	1.6	1.5	1.2	0.7	0.9	7.6	4.3	2.9	2.3	8.2	2.9
Máx	66.4	27	32.4	16	68.6	24.9	56.4	19.9	25	11.5	62.3	22.3	12.5	6.7	2.8	2.4	9.2	4.1	21.4	12.1	7.8	5.7	16.8	10.9
Cuenta	52	71	26	35	46	18	52	71	26	35	46	18	52	71	26	35	46	18	52	71	26	35	46	18

DB = Diámetro basal (cm); *DAP* = Diámetro a la altura del pecho (cm); *AC* = Altura comercial (m); *AT* = Altura total (m); + = Datos utilizados para el modelo de generación; * = Datos utilizados para el modelo de validación.

Recopilación de datos

El 17 de mayo de 2022 (hacia el final de la primavera), de 7:00 am a 7:00 pm, se realizaron ocho vuelos sobre la zona de estudio en sentido norte-sur, con ello se cubrió todo el periodo de la luminosidad del sol; se programaron las respectivas misiones en el cuadricóptero *DJI® Phantom 4 Multispectral*, cuya cámara P4M tiene un sensor RGB y cinco sensores multiespectrales (bandas: azul=450±16 nm, verde=560±16 nm, roja=650±16 nm, borde rojo=730±16 nm, infrarrojo cercano=840±26 nm), todo con una cámara de 2 MP. El vuelo registró fotografías en formato *JPG* (24 bits, para las imágenes tomadas con el sensor RGB) y en formato *TIF* (16 bits, para las obtenidas con los sensores multiespectrales) a una altitud de 60 m, con la cámara en un ángulo de 90° y un traslape de 80 %, y 75 % entre las imágenes y las líneas (Figura 1).

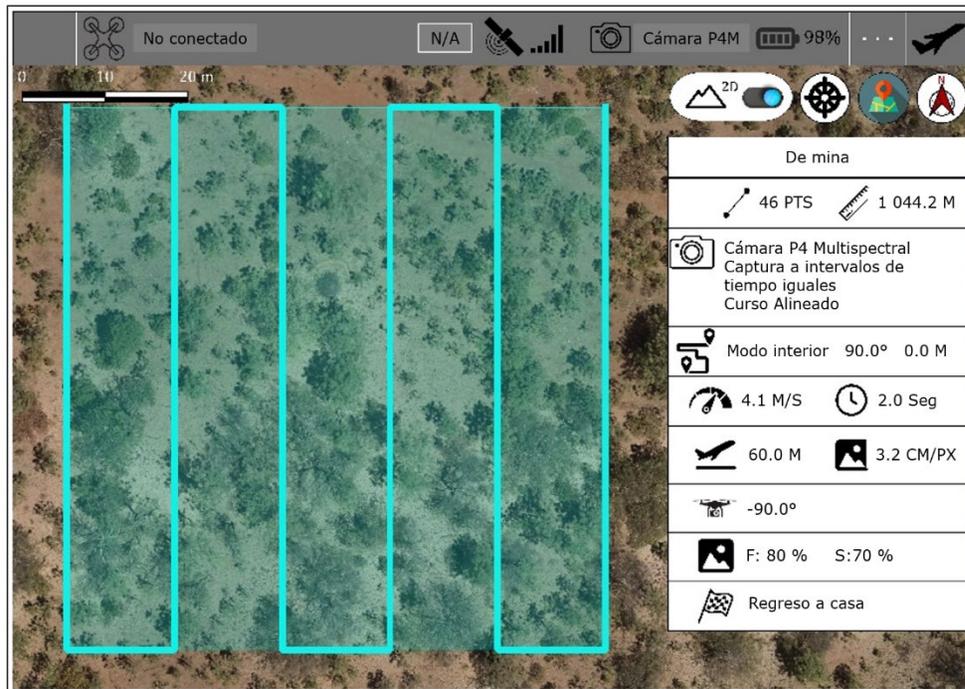


Figura 1. Parámetros de vuelo para el *Phantom 4 Multispectral*.

Se consideró que la corrección de la reflectancia del sensor proporcionada por el fabricante de *DJI*[®] es suficiente. Sin embargo, ningún sensor es perfecto, por lo que se requerirán correcciones radiométricas específicas en futuros estudios (Mamaghani y Salvaggio, 2019), sobre todo en los que se realicen en periodos mensuales o estacionales.

Procesamiento de imágenes y análisis estadístico

Las imágenes se procesaron utilizando técnicas de fotogrametría digital con el *software* de código abierto *OpenDroneMap* (*ODM*, versión 2.8.4; Cleveland *Metroparks*, Ohio, USA) (Vivar-Vivar *et al.*, 2022), mediante los algoritmos *Structure from Motion* y *Multi-View Stereo* para producir una nube de puntos en 3D. No fue necesario geotiquetar las imágenes porque el dron dispone de un sistema de georreferenciación integrado con precisiones verticales y horizontales de ± 0.1 y ± 0.3 m, respectivamente.

A continuación, se generaron los ortomosaicos espectrales (2.9 cm/pixel). Dentro de la parcela seleccionada arbitrariamente, se registraron en total 124 árboles (Cuadro 1), para los que se calculó el *NDVI* a nivel de individuo con la calculadora *raster Q-Gis* (Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020), con base en la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR = Banda infrarrojo cercano

RED = Banda roja

La variación del *NDVI* en función de la hora del día se ajustó a un modelo de tipo cuadrático mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = Y_0 + Y_1t + Y_2t^2 \quad (2)$$

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

t = Hora de la lectura del *NDVI*

Y_0 , Y_1 y Y_2 = Parámetros de ajuste del modelo. Obsérvese que Y_2 es el parámetro del término cuadrático

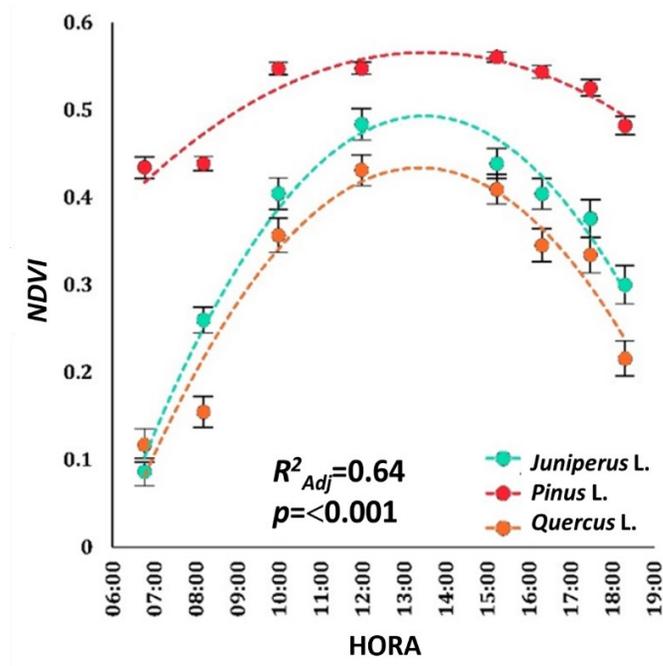
El ajuste del modelo se realizó con la función *lm* del paquete *stats* del programa informático R versión 4.1.1 (R Core Team, 2021), y se comprobaron los supuestos de regresión (Gujarati y Porter, 2009). Las diferencias en los parámetros del modelo entre los géneros arbóreos se analizaron estadísticamente, aplicando contrastes ortogonales predefinidos. La validación del ajuste del modelo se hizo mediante la exploración gráfica entre dos fuentes de datos.

Como estrategia de validación para evaluar el rendimiento de predicción del modelo, se evaluó el rendimiento de predicción a partir de un nuevo conjunto independiente de datos de 124 árboles (Cuadro 1).

Resultados

Durante cada vuelo se capturaron, con el VANT, un total de 141 imágenes RGB y 705 imágenes multiespectrales, las cuales se utilizaron para crear el ortomosaico multiespectral.

La variación diaria del *NDVI* presentó un comportamiento cuadrático (Figura 2). Los valores empezaron a incrementarse a partir de la primera misión y alcanzaron un máximo, aproximadamente, a las 13:00 h para luego disminuir durante el resto del día. Si bien los tres géneros considerados (*Pinus*, *Quercus* y *Juniperus*) mostraron un comportamiento cuadrático, los parámetros del modelo variaron significativamente en función del género (Cuadro 2). En general, *Pinus* tuvo los valores de *NDVI* más altos a lo largo del día y con menor variación (de 0.41 a 0.54). *Juniperus* y *Quercus* registraron semejanzas en su comportamiento y una mayor variación diaria del *NDVI*, con valores de 0.1 en promedio por la mañana y un máximo de aproximadamente 0.45 (Figura 2).



Los puntos representan los valores medios observados a diferentes horas del día. Las líneas discontinuas corresponden a los valores pronosticados por el modelo ajustado, que incluye el género como fuente de variación. Las barras indican barras de error descriptivas.

Figura 2. Variación diurna del *NDVI* en tres géneros arbóreos de la zona estudiada.

Cuadro 2. Estimadores de los parámetros del modelo de tipo cuadrático ajustado a la relación de los valores de *NDVI* en función de la hora del día y del género de árbol.

	Parámetro	Estimación	Error Est.	Valor de <i>t</i>	<i>Pr</i>(> <i>t</i>)
<i>Y₀</i>	<i>Pinus</i> L.	-0.02819	0.06231	-0.452	0.651
	<i>Juniperus</i> L.	-1.05212	0.10783	-9.757	<2e-16
	<i>Quercus</i> L.	-0.98353	0.09088	-10.822	<2e-16
<i>Y₁</i>	<i>Pinus</i> L.	2.10006	0.2573	8.162	1.01e-15
	<i>Juniperus</i> L.	3.49121	0.44527	7.841	1.17e-14
	<i>Quercus</i> L.	3.07798	0.3753	8.201	7.40e-16
<i>Y₂</i>	<i>Pinus</i> L.	-1.85688	0.24246	-7.659	4.50e-14
	<i>Juniperus</i> L.	-3.11087	0.41964	-7.413	2.66e-13
	<i>Quercus</i> L.	-2.78068	0.35368	-7.862	9.92e-15

En el Cuadro 2 se presentan los parámetros estimados y los correspondientes estadísticos de bondad de ajuste de los modelos desarrollados, lo que indica que los parámetros estimados no tienen sesgo. Por ejemplo, el modelo explicó más de 60 % de la varianza. Los mejores ajustes se obtuvieron para el género *Pinus*, mientras que los peores fueron para *Quercus*, lo que se atribuye a la diferencia en el tamaño de la muestra.

En general, los modelos fueron similares a las 13:00 h aproximadamente, lo que sugiere que a esa hora ambos datos presentan un valor máximo. Este resultado evidencia la importancia de considerar la hora del día a la que se mide el *NDVI*, y no limitarse a volar la misión a cualquier hora, como suele hacerse. En el presente

estudio se muestra que el modelo generado es una buena herramienta para los estudios de manejo forestal, y que puede utilizarse para predecir los valores de *NDVI* en función de la adquisición de datos temporales.

Discusión

En este estudio, pionero en bosques mixtos mexicanos, se ha demostrado que el horario en el que se mide el *NDVI* a lo largo del día es inestable, por lo que se convierte en un factor decisivo para la interpretación del índice de verdor en la posterior toma de decisiones. La mayoría de los estudios científicamente documentados que se han realizado durante el acelerado advenimiento de los drones, abordan sus aplicaciones en cultivos (Heinemann *et al.*, 2022); sin embargo, se ha prestado poca atención a los bosques, a pesar de la prometedora perspectiva que ofrecen los drones para estudiar estos ecosistemas (Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020).

Los hallazgos de este estudio representan una oportunidad para afinar el conocimiento de la variación de la reflectancia espectral a nivel de árbol individual, según la variación diurna. Los resultados muestran diferencias significativas en función del momento de la medición, así como entre los géneros estudiados. Sin embargo, un análisis en profundidad de las causas de las diferencias marginales entre los valores del *NDVI* queda fuera del alcance del estudio (Vivar-Vivar *et al.*, 2022).

El patrón diurno de los valores del *NDVI* sigue una tendencia cuadrática parabólica, con un máximo a las 13:00 h para toda la vegetación estudiada (Figura 2). Los valores obtenidos se atribuyen a la mejor recepción de la energía luminosa del sol

en el follaje. Se observa una disminución de la reflectancia al principio y al final del día, en comparación con la hora a la que el sol está en el cenit, lo que está directamente relacionado con los cambios en el ángulo del sol y las sombras resultantes de la vegetación (Maresma *et al.*, 2020; Hama *et al.*, 2021). Beneduzzi *et al.* (2017) señalan que el *NDVI* es afectado por la radiación, y muestran tendencias gráficas opuestas a los hallazgos de la presente investigación. El tipo de sensor, la fenología de las especies y la nubosidad son algunas de las causas de estas diferencias; otra posible razón es la relación *NDVI*-clima, como lo refieren Ghebregabher *et al.* (2020).

La tendencia del *NDVI* con el modelo generado produjo resultados coherentes con los derivados de la validación, ya que la tendencia parabólica es similar para todos los géneros, con un valor máximo alrededor de las 13:00 h. Esto indica que el modelo tiene una buena capacidad de predicción, aunque aún quedan por determinar las causas de las diferencias marginales (tales como la estructura del dosel, las características fisiológicas individuales, etcétera). Por ejemplo, algunas especies pierden hojas durante todas las estaciones del año. Además, el sensor utilizado tiene limitaciones, como la escasa capacidad de penetración de la luz solar en las copas superpuestas.

Los resultados son importantes dado que las condiciones de acceso a los bosques y los cambios repentinos del clima a menudo pueden limitar las misiones de vuelo en momentos específicos. Así, el modelo generado de *NDVI* permite realizar ajustes, incluso después de finalizado el trabajo de campo, en función del momento del muestreo (Maresma *et al.*, 2020). Asimismo, en el bosque la complejidad y magnitud de los cambios fenológicos también plantean la necesidad de analizar, en futuros estudios, una mayor temporalidad y estacionalidad (por ejemplo, de meses) (Li *et al.*, 2021).

Sin embargo, los umbrales de heterogeneidad temporal de la reflectancia constituyen un punto de partida fiable y contribuyen al conocimiento, que no

siempre puede lograrse con las imágenes satelitales. Se ha demostrado que los VANT calculan el *NDVI* con mayor precisión que el *Sentinel-2* de 10 m, incluso como parte de estudios para controlar la fenología del dosel (Khaliq *et al.*, 2019).

Los valores del *NDVI* no deben confundirse con la actividad fotosintética (no estudiada aquí), ya que esta variable requiere de una investigación exhaustiva que incluya mediciones reales sobre el terreno, más allá del nivel foliar. Además, el estado hídrico de la planta y la orientación de las hojas durante el día pueden contribuir a las diferencias diurnas en la reflectancia (Rischbeck *et al.*, 2014). Buchhart y Schmidhalter (2022) refieren que las mediciones deben realizarse cada hora, aunque los autores hicieron esta recomendación para cultivos y no para árboles.

Si bien se documenta que los índices de verdor diurno de las copas siguen un patrón de heterogeneidad, la magnitud de la variabilidad fotosintética en las especies estudiadas sigue siendo un reto que merece un análisis más profundo, incluso más allá del nivel foliar (Pompa-García *et al.*, 2022). Dado que la reflectancia espectral captada por un sensor de un VANT puede asociarse a la geometría del dosel y a la estructura del follaje, una posible limitación es la variación espectral espuria que puede confundirse con la fotosíntesis potencial (Vivar-Vivar *et al.*, 2022).

Por tanto, los valores máximos de *NDVI* registrados a las 13:00 h no deben interpretarse, necesariamente, como el momento de máxima actividad fotosintética, sino que estas métricas corresponden a la reflectancia de la energía captada por el sensor en ese momento (Vivar-Vivar *et al.*, 2022), por lo que deben tratarse con cierta precaución, aunque la comunidad científica recomienda utilizar esta hora del día, salvo que las condiciones meteorológicas adversas lo impidan.

Lo anterior implica la necesidad de continuar con las investigaciones que permitan afinar las estimaciones de estos estudios experimentales, en las que se considere la duración del vuelo para determinar la variación espectral entre el inicio y el final de

cada misión, así como los datos de radiancia, temperatura y humedad (Hama *et al.*, 2021), y también las características de la vegetación (Jacquemoud *et al.*, 2009) y la evaluación específica de la estructura y disposición del follaje (Li *et al.*, 2020).

Dado que la calidad de la información espectral depende de los parámetros de configuración del vuelo a trayectorias y altitudes específicas, entre otros factores (Vivar-Vivar *et al.*, 2022). Así, los vuelos deben configurarse para obtener la mejor perspectiva de la variable de interés. Sin embargo, es necesario equilibrar los costos y beneficios de las estrategias de gestión que se desarrollen sobre el terreno. Se requiere de una información precisa del *NDVI* para evaluar la eficacia de las prácticas silvícolas sobre el terreno o para realizar ajustes en las predicciones, ya que el *NDVI* puede ser un indicador potencial del vigor y de los niveles de estrés de las plantas, entre otras características (Huang *et al.*, 2021).

Se observó heterogeneidad en las respuestas de reflectancia a la hora de la captura de la imagen, dentro de los diferentes géneros, lo que pone en perspectiva la necesidad de configurar acciones específicas hacia la sostenibilidad, ya que estos bosques están sujetos a gestión forestal. Las causas aún pueden afinarse con más misiones de vuelo y un mejor conocimiento de las verdaderas estimaciones de las capacidades fotosintéticas. La heterogeneidad de las respuestas del *NDVI*, cuando se consideran datos temporales, es crucial para diseñar estrategias de conservación y manejo en ecosistemas megadiversos.

La estrategia de usar datos independientes para la validación del modelo reforzó los resultados. La metodología propuesta permite utilizar un modelo estadísticamente sólido y funcional. La obtención de datos de árboles representativos, como los que se muestrearon, garantiza la fiabilidad de los resultados por su relevancia para su aplicación directa por el gestor forestal. Dado que estos árboles están bajo manejo y que sus copas están completamente desarrolladas, representan una valiosa entrada de datos para posteriores investigaciones.

Conclusiones

El *NDVI* no permanece fijo a lo largo del día, lo que podría atribuirse al ángulo del sol. Los valores máximos se obtuvieron a las 13:00 h para todos los géneros y posteriormente disminuyeron a medida que el ángulo cenital solar disminuía.

Los bosques incoetáneos y su excepcional diversidad arbórea constituyen un escenario ideal para identificar las interacciones *NDVI*-árbol. Este conocimiento adquirido tiene grandes implicaciones para facilitar el manejo sustentable en los bosques multiespecíficos de montaña, que son los de mayor distribución en el territorio mexicano.

El análisis del *NDVI* debe integrarse como una herramienta para la gestión forestal, pero sin sustituir el uso de datos *in situ*, que siguen proporcionando información esencial sobre la estructura del bosque. Además, habría que estudiar más índices espectrales de la vegetación, así como realizar la calibración del sensor, sobre todo en los estudios estacionales a más largo plazo. Asimismo, deben evaluarse los parámetros ambientales y las configuraciones de los equipos, y realizar experimentos como el que se documenta en horizontes temporales estacionales y con mayor resolución de la vegetación (por ejemplo, a nivel de especie).

Agradecimientos

Los autores agradecen al Conahcyt por el apoyo brindado a través del proyecto A1-S-21471 y DendroRed (<http://dendrored.ujed.mx>; accesado el 26 de octubre de 2023). Al Herbario CIIDIR-Durango, especialmente a la Dra. M. Socorro González-

Elizondo por la identificación taxonómica de los especímenes recolectados. Al editor y a los tres Árbitros por su tiempo y sus valiosos comentarios.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución por autor

Marín Pompa-García: conceptualización, recopilación de datos, investigación, recursos y redacción-preparación del borrador original; José Ángel Sigala-Rodríguez: metodología, *software*, validación y edición; Eduardo Daniel Vivar-Vivar: metodología, diseño experimental y análisis formal; Felipa de Jesús Rodríguez-Flores: metodología, diseño experimental, recursos; Joel Rascón-Solano: revisión, corrección y supervisión. Todos los autores leyeron y aceptaron la versión publicada del manuscrito.

References

- Beneduzzi, H. M., E. G. Souza, C. L. Bazzi and K. Schenatto. 2017. Temporal variability in active reflectance sensor-measured NDVI in soybean and wheat crops. *Engenharia Agrícola* 37(4):771-781. Doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p771-781/2017.
- Buchhart, C. and U. Schmidhalter. 2022. Daytime and seasonal reflectance of maize grown in varying compass directions. *Frontiers in Plant Science* 13:1029612. Doi: 10.3389/fpls.2022.1029612.

- Dronova, I. and S. Taddeo. 2022. Remote sensing of phenology: Towards the comprehensive indicators of plant community dynamics from species to regional scales. *Journal of Ecology* 110(7):1460-1484. Doi: 10.1111/1365-2745.13897.
- Fawcett, D., J. Bennie and K. Anderson. 2021. Monitoring spring phenology of individual tree crowns using drone-acquired NDVI data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 7(2):227-244. Doi: 10.1002/rse2.184.
- Gallardo-Salazar, J. L. and M. Pompa-García. 2020. Detecting individual tree attributes and multispectral indices using Unmanned Aerial Vehicles: Applications in a Pine clonal orchard. *Remote Sensing* 12(24):4144. Doi: 10.3390/rs12244144.
- Ghebregabher, M. G., T. Yang, X. Yang and T. E. Sereke. 2020. Assessment of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 23(3):249-261. Doi: 10.1016/j.ejrs.2020.08.003.
- González-Elizondo, M. S., M. González-Elizondo, J. A. Tena-Flores, L. Ruacho-González e I. L. López-Enríquez. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botánica Mexicana* 100:351-403. Doi: 10.21829/abm100.2012.40.
- Gujarati, D. N. and D. C. Porter. 2009. *Basic Econometrics*. McGraw-Hill. New York, NY, United States of America. 922 p.
- Hama, A., K. Tanaka, B. Chen and A. Kondoh. 2021. Examination of appropriate observation time and correction of vegetation index for drone-based crop monitoring. *Journal of Agricultural Meteorology* 77(3):200-209. Doi: 10.2480/agrmet.D-20-00047.
- Heinemann, P., S. Haug and U. Schmidhalter. 2022. Evaluating and defining agronomically relevant detection limits for spectral reflectance-based assessment of N uptake in wheat. *European Journal of Agronomy* 140:126609. Doi: 10.1016/j.eja.2022.126609.
- Huang, S., L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang and G. Shao. 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular

- remote sensing. *Journal of Forestry Research* 32(1):1-6. Doi: 10.1007/s11676-020-01155-1.
- Jacquemoud, S., W. Verhoef, F. Baret, C. Bacour, ... and S. L. Ustin. 2009. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113(S1):S56-S66. Doi: 10.1016/j.rse.2008.01.026.
- Khaliq, A., L. Comba, A. Biglia, D. R. Aimonino, M. Chiaberge and P. Gay. 2019. Comparison of satellite and UAV-based multispectral imagery for vineyard variability assessment. *Remote Sensing* 11(4):436. Doi: 10.3390/rs11040436.
- Li, D., J. M. Chen, X. Zhang, Y. Yan, ... and W. Cao. 2020. Improved estimation of leaf chlorophyll content of row crops from canopy reflectance spectra through minimizing canopy structural effects and optimizing off-noon observation time. *Remote Sensing of Environment* 248:111985. Doi: 10.1016/j.rse.2020.111985.
- Li, W., J. Jiang, M. Weiss, S. Madec, ... and F. Baret. 2021. Impact of the reproductive organs on crop BRDF as observed from a UAV. *Remote Sensing of Environment* 259:112433. Doi: 10.1016/j.rse.2021.112433.
- Mamaghani, B. and C. Salvaggio. 2019. Multispectral sensor calibration and characterization for sUAS Remote Sensing. *Sensors* 19(20):4453. Doi: 10.3390/s19204453.
- Maresma, A., L. Chamberlain, A. Tagarakis, T. Kharel, ... and Q. M. Ketterings. 2020. Accuracy of NDVI-derived corn yield predictions is impacted by time of sensing. *Computers and Electronics in Agriculture* 169:105236. Doi: 10.1016/j.compag.2020.105236.
- Pompa-García, M., J. A. Martínez-Rivas, R. D. Valdez-Cepeda, C. A. Aguirre-Salado, ... and D. J. Vega-Nieva. 2022. NDVI values suggest immediate responses to fire in an uneven-aged mixed forest stand. *Forests* 13(11):1901. Doi: 10.3390/f13111901.
- Právělie, R., I. Sîrodoev, I.-A. Nita, C. Patriche, ... and M.-V. Birsan. 2022. NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987-2018. *Ecological Indicators* 136:108629. Doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108629.

R Core Team. 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing (version 4.1.1.). R Foundation for Statistical Computing. Vienna, W, Austria. <https://www.R-project.org>. (November 6th, 2023).

Rischbeck, P., P. Baresel, S. Elsayed, B. Mistele and U. Schmidhalter. 2014. Development of a diurnal dehydration index for spring barley phenotyping. *Functional Plant Biology* 41(12):1249-1260. Doi: 10.1071/FP14069.

Vivar-Vivar, E. D., M. Pompa-García, J. A. Martínez-Rivas and L. A. Mora-Tembre. 2022. UAV-Based characterization of tree-attributes and multispectral indices in an uneven-aged mixed conifer-broadleaf forest. *Remote Sensing* 14(12):2775. Doi: 10.3390/rs14122775.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0* [Atribución-No Comercial \(CC BY-NC 4.0 Internacional\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.