



**Polibotánica**

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

# EVALUACIÓN DE UNA RESTAURACIÓN MEDIANTE DRON EN EL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO

## EVALUATION OF A RESTORATION THROUGH DRONE IN THE TAMAULIPECO THORNSCRUB

**Gutiérrez-Barrientos, M.; J.D. Marín-Solís; E. Alanís-Rodríguez y E. Buendía-Rodríguez.**  
EVALUACIÓN DE UNA RESTAURACIÓN MEDIANTE DRON EN EL MATORRAL  
ESPINOSO TAMAULIPECO.  
EVALUATION OF A RESTORATION THROUGH DRONE IN THE TAMAULIPECO  
THORNSCRUB.



## EVALUACIÓN DE UNA RESTAURACIÓN MEDIANTE DRON EN EL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO.

### EVALUATION OF A RESTORATION THROUGH DRONE IN THE TAMAULIPECO THORNSCRUB.

Gutiérrez-Barrientos, M.;  
J.D. Marín-Solís;  
E. Alanís-Rodríguez  
y E. Buendía-Rodríguez.

EVALUACIÓN DE UNA  
RESTAURACIÓN  
MEDIANTE DRON EN EL  
MATORRAL ESPINOSO  
TAMAULIPECO.

EVALUATION OF A  
RESTORATION THROUGH  
DRONE IN THE  
TAMAULIPECO  
THORNSCRUB.

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 54: 71-85. Julio 2022

DOI:  
10.18387/polibotanica.54.5

**M. Gutiérrez-Barrientos**

**J.D. Marín-Solís**

*Geoprospect S.A. de C.V. Carretera a la Concha S/N,  
Colonia San Felipe, Linares, Nuevo León, México.*

**E. Alanís-Rodríguez**

*Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera  
Linares-Cd. Victoria km 145. Apartado Postal 41. CP 67700, Linares, N. L. México.*

**E. Buendía-Rodríguez** / [buendia.enrique@inifap.gob.mx](mailto:buendia.enrique@inifap.gob.mx)

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) -  
Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX). Carretera Los Reyes-Texcoco,  
Km 13.5. Coatlinchán CP 56250, Estado de México, México.*

**RESUMEN:** La evaluación de los proyectos de restauración forestal por su importancia suele efectuarse a largo plazo con evaluaciones intermedias, por lo que se requiere nuevas metodologías que requiera disminuir los tiempos de evaluación en campo mediante drones. El objetivo de este trabajo fue probar la utilidad de un sistema transportado por drones para el monitoreo de una plantación forestal. Se realizó la evaluación en campo de sobrevivencia y estado de vigor de 18,520 plantas, registrando la ubicación, especie, sobrevivencia (V = vivo, M = muerto) y vigor de la planta (M = Malo, R = Regular y B = Bueno). El vuelo se realizó con un dron marca Wingtra, equipado una cámara multiespectral Micasense® Altum® de seis sensores de nueva generación (azul, verde, rojo, borde rojo, infrarrojo cercano y térmico) con esta información se calculó el NDVI y se realizó la extracción de los valores según un búfer de 30 cm (punto central, promedio, mediana y mayoría del búfer) de la coordenada de ubicación de la planta. Se determinó que los valores promedio del NDVI para plantas muertas fue de  $0.266 \pm 0.053$  y las plantas vivas de  $0.482 \pm 0.105$ , donde se obtuvo un 57.72% de exactitud global. Para el vigor, se obtuvo una exactitud global de 43.79% con el valor central del NDVI, el promedio del vigor malo fue de  $0.226 \pm 0.054$ , el vigor regular  $0.365 \pm 0.009$  y, por último, el vigor bueno  $0.506 \pm 0.01$ . Se concluye que, el sensor multiespectral transportado por dron tiene potencial de ser usado para evaluar plantaciones forestales de especies mixtas del matorral espinoso tamaulipeco.

**Palabras clave:** Dron, NDVI, sobrevivencia, vigor.

**ABSTRACT:** The evaluation of forest restoration projects due to their importance is usually carried out in the long term with intermediate evaluations, which is why new methodologies are required that require reducing evaluation times in the field using drones. The objective of this work was to test the usefulness of a system carried by drones for the monitoring of a forest plantation. The field evaluation of survival and vigor status of 18,520 plants was carried out, recording the location, species, survival (V = alive, M = dead) and vigor of the plant (M = Bad, R = Regular and B = Good). It was determined that the average NDVI values for dead plants were  $0.266 \pm 0.053$  and live plants were  $0.482 \pm 0.105$ , where a global accuracy of 57.72% was obtained. For vigor, a global accuracy of 43.79% was obtained with the central value of the NDVI, the average for bad vigor was  $0.226 \pm 0.054$ , for regular vigor  $0.365 \pm 0.009$  and,

finally, for good vigor  $0.506 \pm 0.01$ . It was concluded that the multispectral sensor carried by drone has the potential to be used to evaluate forest plantations of mixed species of the Tamaulipas thorny scrub.

**Key word:** Drone, NDVI, survival, vigor.

## INTRODUCCIÓN

La conservación, gestión y restauración de los recursos forestales son objetivos del desarrollo socioeconómico sustentable (Katila *et al.*, 2019). La evaluación de los proyectos de restauración forestal suele efectuarse a largo plazo con evaluaciones intermedias (Barbati *et al.*, 2007). Las evaluaciones intermedias sirven para evaluar el éxito o fracaso así emprender acciones correctivas de gestión (Pequeño-Ledezma *et al.*, 2016). Generalmente, la evaluación de los proyectos de restauración forestal se realiza *in situ*, midiendo directamente variables dasométricas y determinando la vigorosidad de los árboles o arbustos plantados (Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V.M., Collantes-Chavéz-Costa, A., Buendía-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A., Sánchez-Castillo, L., 2021; Alanís Rodríguez *et al.*, 2016).

Sin embargo, el seguimiento de la condición de los árboles y arbustos mediante inventarios *in situ* a grandes escalas demanda largos periodos de tiempo y altos costos económicos (van Leeuwen & Nieuwenhuis, 2010). Para disminuir los tiempos de evaluación en campo se requiere de nuevas metodologías como el uso de la teledetección, una de esas técnicas es la evaluación mediante vehículos aéreos no tripulados (dron, también conocidos como drones) (Doi, 2020). El uso de sensores remotos transportados por vehículos aéreos no tripulados en estudios forestales, ecológicos y de restauración ecológica está aumentando en los últimos años (Anderson & Gaston, 2013; Cao, W.; Wu, J.; Shi, Y.; Chen, 2022; Gallardo-Salazar, J. L., Pompa-García, M., Aguirre-Salado, C. A., López-Serrano, P. M., & Meléndez-Soto, 2020; Goodbody *et al.*, 2017).

Estos drones son una alternativa para evaluar el estado fitosanitario y supervivencia de las plantas a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), calculado a partir de imágenes multiespectrales de alta resolución (Almeida *et al.*, 2019). El NDVI se utiliza con frecuencia para monitorear sequías, predecir la producción agrícola, ayudar a predecir zonas de incendios y áreas de desertización, así como el vigor de la vegetación de las cuales es posible extraer información valiosa acerca de la fenología de la vegetación (Reed B. *et al.*, 2009). Asimismo el NDVI es el índice preferido para el seguimiento global de la vegetación, ya que ayuda a compensar cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie sobre la cual se asientan las plantas, exposiciones de laderas y otros factores externos (Wang *et al.*, 2004).

Los drones presentan un enorme potencial para el monitoreo de comunidades forestales y puede ser una herramienta crucial para la toma de decisiones en los proyectos restauración forestal (Almeida *et al.*, 2019; Doi, 2020). Aunque actualmente se ha incrementado el uso de drones, es necesario la generación o adaptación de esta tecnología en diversas comunidades vegetales, por lo que, en esta investigación se exploró el potencial de un sistema transportado por dron para evaluar una plantación forestal de especies mixtas en el matorral espinoso tamaulipeco. El objetivo fue evaluar el uso de un sistema dron para cuantificar las variables de sobrevivencia y vigor de los árboles y arbustos los cuales se analizaron con las evaluaciones realizadas en el campo para el monitoreo espacial de una plantación forestal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Se localiza en el sur de la Central Eléctrica Pesquería, ubicada en municipio de Pesquería,

Nuevo León, México (Fig. 1). En esta zona se encuentra el área de restauración conformada por 11 lotes y un total de 18,520 plantas del matorral espinoso tamaulipeco (MET). El clima es templado semicálido húmedo con temperatura promedio de 21.1 °C y precipitación máxima de 550 mm de acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por (García, 2004). El tipo de suelo es vertisol y castañozem (Alanís Rodríguez *et al.*, 2016).

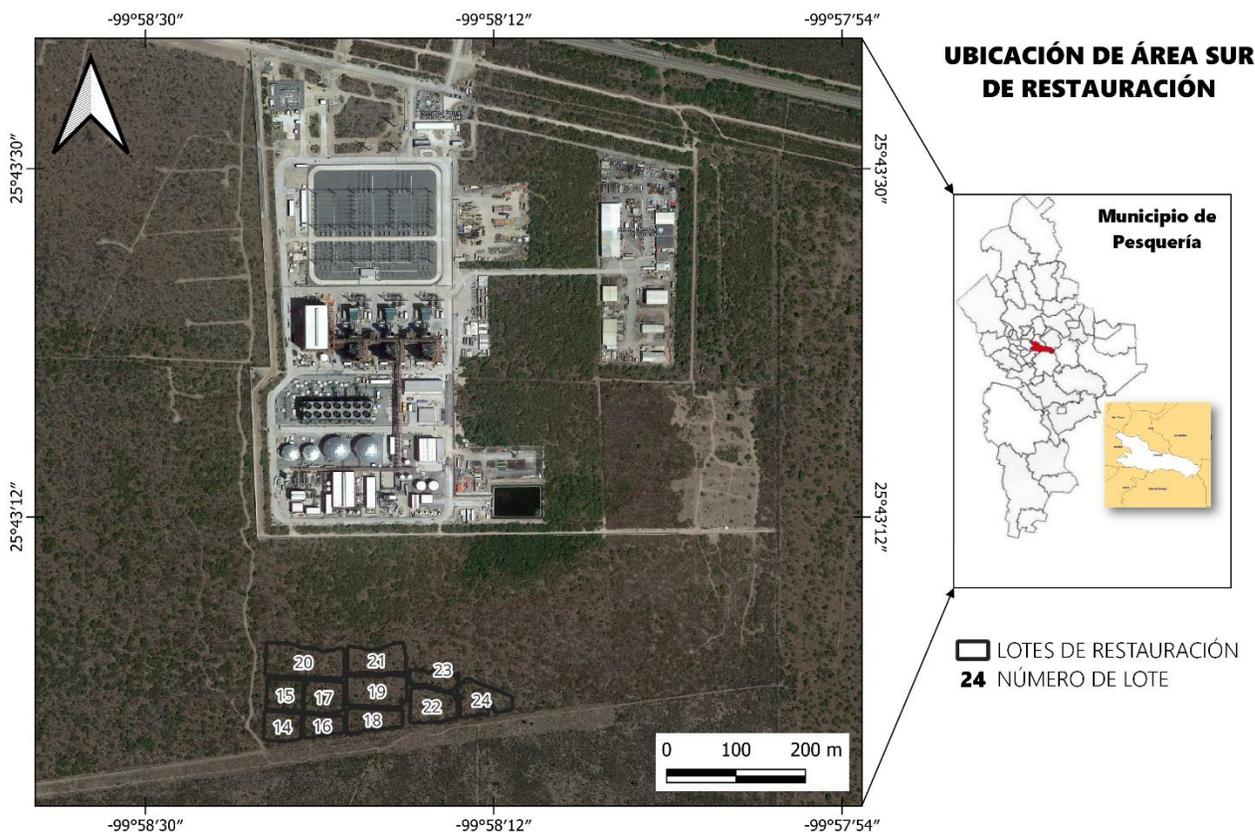


Fig. 1. Localización del área de estudio.

#### Datos de campo

La evaluación en campo se realizó con un censo de los individuos plantados en la reforestación evaluando supervivencia y vigor, para lo cual se registró: Ubicación (clave de identificación, sitio de plantación, sección, línea y coordenadas UTM (x, y) tomadas con GPS Topcon® GR-5 de alta precisión), además para cada planta, se determinó la sobrevivencia (V = viva, M = muerta), donde muerta se consideró a las plantas con el tallo principal y secundario muerta, totalmente desprovisto de hojas y viva (V) con algún indicio de ello. Asimismo, para evaluar el vigor (M = malo, R = regular y B = bueno), se tomó en cuenta que: para el vigor malo (M), plantas con estrés hídrico, tallos con pocos indicios de vida con hojas remanentes de color amarillo, café y/o blanco, fácilmente caedizas por manipulación; vigor regular (R), plantas bajo estrés hídrico ligero, tallos con baja densidad foliar, hojas en un solo estado de desarrollo (sin rebrotes) algunas caedizas y de color menos intenso que en su estado pleno; vigor bueno (B), plantas en condición hídrica adecuada, tallos sanos con mayor densidad de follaje, hojas en desarrollo y bien desarrolladas, algunas hojas presentan color intenso, algunas de plantas pueden presentar rebrotes e inflorescencias.

### Información multispectral

Para la obtención de las imágenes se utilizó un dron marca Wingtra® que se caracteriza por su despegue y aterrizaje vertical, está considerado como de ala fija y propulsión eléctrica con una envergadura del ala de 125 cm, con un peso de 3.7 kg, que incorpora a bordo tecnología avanzada que permite estabilizar y volar mediante GPS (Fig. 2). El vuelo se realizó en diciembre del 2020 en dirección E-W a una altura de 75 m a partir del nivel del suelo y se voló a una velocidad de  $10 \text{ m s}^{-1}$ , las imágenes resultado del vuelo tienen una resolución espacial del pixel de  $3.25 \text{ cm}^2$ .



Fig. 2. Dron Wingtra® con cámara Altum®.

La cámara multispectral fue una MicaSense® Altum® que tiene un peso de 406.5 g con un tamaño de 8.2 cm x 6.7 cm x 6.45 cm y esta provista de 6 sensores: azul (475 nm), verde (560 nm), rojo (668 nm), límite del rojo (717 nm), infrarrojo cercano (842 nm) y térmico (8-14 nm). El procesamiento de las imágenes multispectrales fue realizado con el software PIX4D® para generar el ortomosaico de la zona de estudio, de cada una de las bandas (Castillo et al., 2018; Samy Kharuf-Gutierrez, Luis Hernández-Santana, Rubén Orozco-Morales & Díaz, 2018).

Se utilizó el NDVI, el cual es un indicador de la salud de la vegetación y funciona comparando matemáticamente la cantidad de luz roja visible absorbida y la luz infrarroja cercana reflejada. (Congalton & Green, 2019). Se calculó con la siguiente expresión:

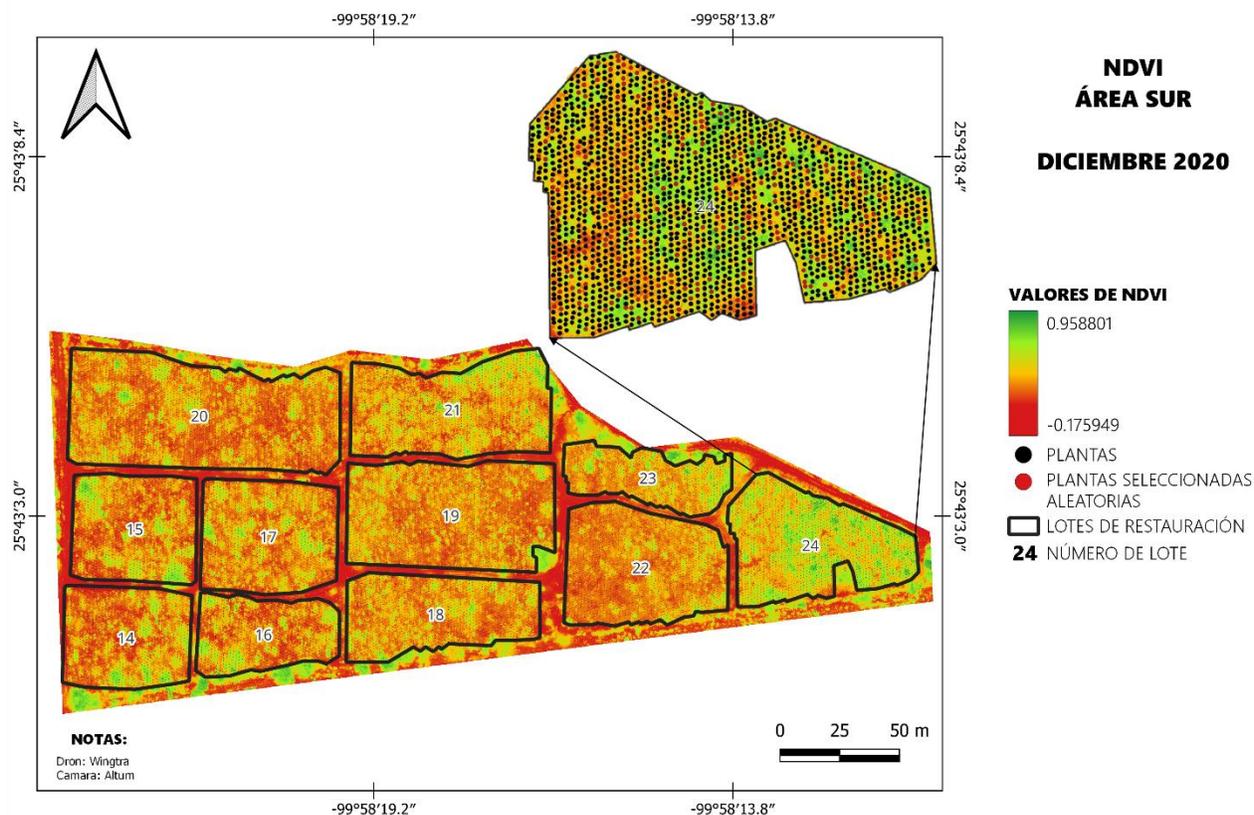
$$NDVI = \frac{\text{infrarrojo cercano} - \text{roja}}{\text{infrarrojo cercano} + \text{roja}}$$

Una vez que se generó la banda con valores de -1 a 1 nivel digital correspondiente al NDVI, se realizó la extracción de valores espectrales para evaluar la supervivencia y el vigor, para lo cual se utilizó un archivo con las coordenadas UTM de la ubicación de cada planta, donde se probaron cuatro tipos de valores: Uno de ellos fueron los valores puntuales del pixel central; para los siguientes tres se ocupó un búfer circular de 30 cm y se obtuvo información estadísticas básicas de media, mediana y mayoría, respectivamente, para el establecimiento de los rangos de vigor previamente definidos (malo, regular, bueno), estos procedimientos se realizaron en el software QGIS® versión 3.18.1.

### Análisis estadístico

Para la evaluación de las plantas utilizadas para la restauración de 18,520 plantas, del total de los registros se segmentaron en tres grupos en forma aleatoria: uno sirvió para realizar los análisis para determinar los rangos espectral del NDVI donde se extrajo los datos de sobrevivencia (viva o muerta) y vigor (malo, regular, bueno) (75%, 13,890 plantas) y otros dos

grupos que se utilizaron para la evaluación de la sobrevivencia (10%, 1,852 plantas) y otro 10% diferente para evaluar vigor (1,852 plantas) (Fig. 3).



**Fig. 3.** Mapa del NDVI para el área de estudio con las plantas de la reforestación.

Con el primer grupo de datos (75%), se realizaron pruebas para evaluar la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, para verificar que se cumplieran los supuestos de los residuales ambas con un grado de significancia ( $\alpha < 0.05$ ), con ayuda del software SPSS® ver 19.0. Ya que se comprobó el cumplieron los supuestos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor (una con sobrevivencia y otra con vigor) para los valores puntuales de NDVI, valores promedio de búfer, valores de mediana del búfer y valores de mayoría del búfer, se utilizó la prueba de Tukey para determinar si existían diferencias significativas ( $\alpha < 0.05$ ), esto con la finalidad de asignar los rangos digitales tanto de sobrevivencia y de vigor (malo, regular y bueno) (Zar, 2010).

Además, con los dos grupo de datos se realizó la verificación de campo mediante la clasificación de supervivencia (10%) y del vigor (10%, sin los individuos considerados muertos), con esta información se generó una matriz de confusión para cada uno de los grupos de datos analizados, donde se visualiza la exactitud del usuario que representa los valores clasificados de manera correcta y la exactitud del producto que representa los valores verificados en campo (Clase real), así como, los errores de omisión que representan los individuos que pertenecieron a una categoría no fueron incluidas en ella y los errores de comisión que representan las plantas incluidas en una categoría, cuando realmente no pertenecen a ella. Además, se calculó exactitud global la cual representa los individuos que fueron clasificados de manera correcta (diagonal principal) y el índice Kappa ( $k$ ) que determina el ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación y mide la diferencia entre clasificación

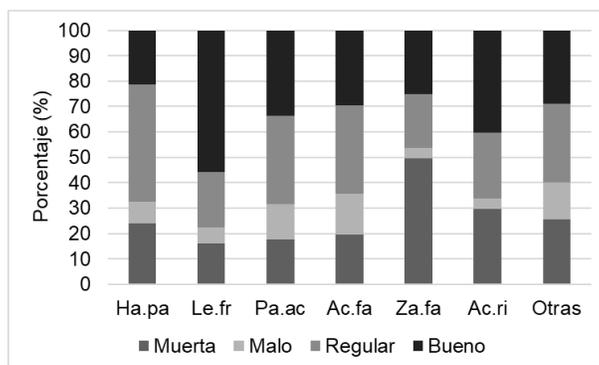
contra la realidad observada y reduce la que se esperaría simplemente por el azar (Chuvieco, 1996; Congalton & Green, 2019).

## RESULTADOS

### Estadísticas básicas de la plantación

La restauración se realizó con 22 especies de la nativa región, de las cuales el 80% lo componen seis especies: *Havardia pallens* (Benth.) Britton & Rose (29.23%), *Leucophyllum frutescens* (Berland.) I. M. Johnst. (15.79%), *Parkinsonia aculeata* L. (11.22%), *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (10.84%), *Zanthoxylum fagara* (L.) Sarg. (6.93%) y *Acacia rigidula* Benth. (5.27%). Del total de los individuos plantados el 23.93% no sobrevivieron (muertas), mientras que el 76.07% sobrevivieron; 31.88% con vigor bueno, 33.89% con vigor regular y un 10.3% con vigor malo.

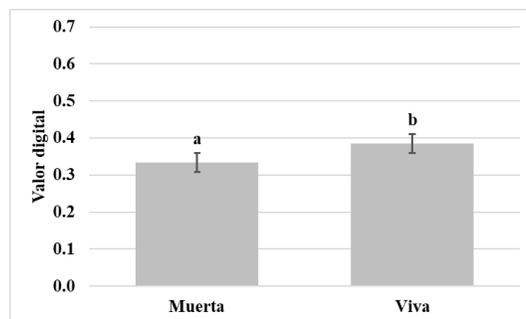
En el comportamiento de sobrevivencia y vigor por especie presenta diferencia en los porcentajes, la especie que mayor porcentaje de mortandad fue *Zanthoxylum fagara* (49.49%) y también fue la que presentó menor porcentaje de vigor bueno. Mientras que la que menor porcentaje de muertas fue *Leucophyllum frutescens* (16.04%), y es la que mayor porcentaje de vigor bueno presentó (55.75%). La mayoría la mortandad por especie se encuentra en un rango de 20 a 30%, en tanto que, el vigor malo se ubica desde 4 hasta 16%. El vigor regular varía de 21 a 46%, y muy similar el vigor bueno con un rango de 21 hasta 56% (Fig.4).



**Fig. 4.** Valores de sobrevivencia y vigor obtenidos en campo. Donde Ha.pa: *Havardia pallens*, Le.fr: *Leucophyllum frutescens*, Pa.ac: *Parkinsonia aculeate*, Ac.fa: *Acacia farnesiana*, Za.fa: *Zanthoxylum fagara*, y Ac.ri: *Acacia rigidula*.

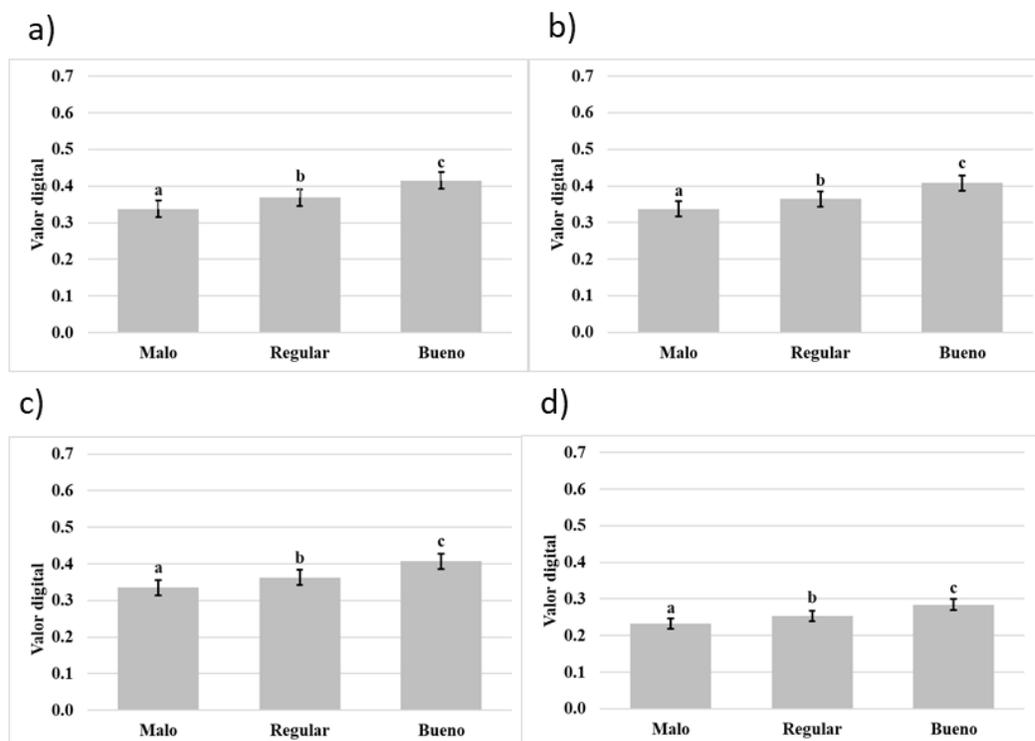
### Asignación de rangos digitales

Una vez que se definieron los rangos y se realizó la asignación de los valores digitales de vigor por cada clase digital, se encontró que existe una diferencia significativa entre los dos grupos (viva y muerta) (Fig. 5).



**Fig. 5.** Evaluación de la sobrevivencia, promedio y error estándar de valores digitales del NDVI. Letras (a y b) indican niveles diferentes de significancia para  $\alpha < 0.05$ .

En tanto que, para la asignación de las clases en los cuatro tipos de datos para determinar el vigor se encontró que existen diferencias significativas para todos los casos con un  $\alpha < 0.05$ ; con valores de F de 392.451, 412.106, 404.417 y 281.899, para los valores de puntuales del NDVI (Fig. 6a), valores promedio del búfer (Fig. 6b), valores de mediana del búfer (Fig. 6c) y valores de mayoría del búfer (Fig. 6d), respectivamente.

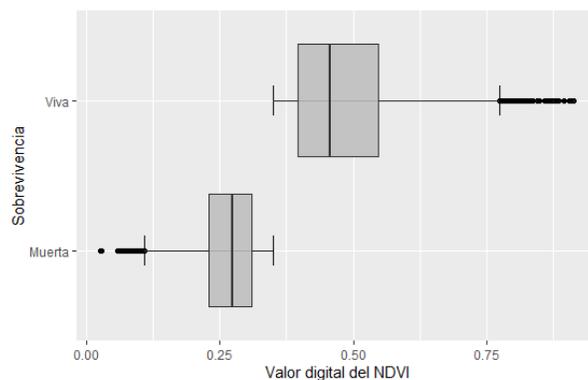


**Fig 6.** Evaluación de vigor: a) valores del punto central del NDVI, b) valores promedio del búfer, c) valores mediana del búfer d) valores de mayoría del búfer. Letras (a, b y c) indican niveles diferentes de significancia para  $\alpha < 0.05$ .

#### Evaluación de la clasificación de sobrevivencia

Al realizar la evaluación de sobrevivencia de las plantas con la información del 10% utilizado para la evaluación de la sobrevivencia se encontró que el 17.0% fue clasificada como muerta, mientras que, el 40.8% se clasificó como vivas. El rango digital de NDVI que corresponde a las plantas muertas van desde 0.026 hasta 0.35, mientras que, para las plantas vivas fueron valores

digitales del NDVI mayores del 0.35 hasta 0.0914. Los valores promedios para las plantas muertas fueron de  $0.266 \pm 0.053$  (promedio  $\pm$  desviación estándar), mientras que, para las plantas vivas el promedio fue de  $0.482 \pm 0.105$  (Fig. 7).



**Figura 7.** Gráfica de valores promedio, desviación estándar y cuartiles de la sobrevivencia. Los puntos negros representan datos atípicos.

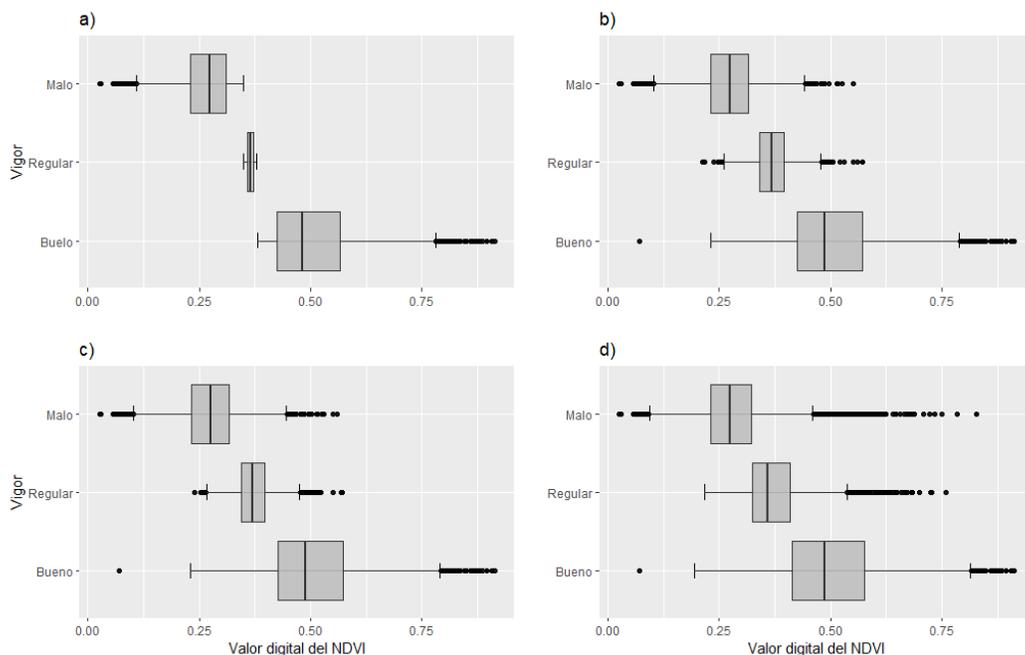
En la matriz de confusión se puede observar que la exactitud del usuario (clasificación con el método propuesto) para las plantas muertas fue de 33.87%, un 31.01% menor a lo registrado en campo, mientras que para las plantas clasificadas como viva la exactitud del usuario fue del 81.62%, que fue mayor a lo registrado en campo (55.20%) (Tabla 1). Por lo que, la exactitud global al separar las plantas vivas de las muertas mediante el análisis del NDVI fue de 57.72% y un valor kappa de 0.155.

**Tabla 1.** Matriz de confusión para evaluar la sobrevivencia.

	<i>Muerta</i>	<i>Viva</i>	<i>Total</i>	<i>Exactitud del producto</i>	<i>Errores de omisión</i>
<b>Muerta</b>	<b>314</b>	170	484	64.88	35.12
<b>Viva</b>	613	<b>755</b>	1368	55.20	44.80
<b>Total</b>	927	925	<b>1852</b>		
<b>Exactitud del usuario</b>	33.87	81.62			
<b>Error de comisión</b>	66.13	18.38			
				<b>Exactitud Global</b>	<b>57.72</b>
				<b>Kappa</b>	<b>0.155</b>

#### Evaluación de la clasificación del vigor

Para la clasificación del vigor, la información quedó clasificada con el 22.8% con vigor malo, mientras que, para el vigor regular fue del 3.2% y, por último, el 17.7% fue clasificado como vigor bueno. Los rangos de valores digitales puntual del NDVI para las plantas con vigor malo fue  $0.226 \pm 0.054$ , para el vigor regular fue de  $0.365 \pm 0.009$ , y el vigor bueno fue de  $0.506 \pm 0.01$  (Fig. 8a).



**Fig. 8.** Gráfica de valores promedio, desviación estándar y cuartiles de vigor: a) valores del NDVI, b) valores promedio del bufer, c) valores de mediana del bufer, y d) valores de mayoría del buffer. Los puntos negros representan datos atípicos.

Como resultado de la matriz de confusión producto de la clasificación del vigor mediante el análisis de los valores promedio del búfer (Tabla 2), la exactitud del usuario solo fue del 47.63, 38.46 y 42.65%, para vigor malo, regular y bueno, respectivamente. El porcentaje de exactitud del usuario (clasificación) fue menor para vigor malo y regular fue menor al clasificado en campo (16.17 y 15.2, respectivamente), mientras que para el vigor regular la fue mayor en un 28.81% del total, que representa un error de omisión del 90.53%. La exactitud global fue de 43.79% y el valor kappa de 0.155.

**Tabla 2.** Matriz de confusión para evaluar vigor con valores del NDVI.

	Malo	Regular	Bueno	Total	Exactitud del producto	Errores de omisión
<b>Malo</b>	423	50	190	663	63.80	36.20
<b>Regular</b>	311	60	251	622	9.65	90.35
<b>Bueno</b>	193	46	328	567	57.85	42.15
<b>Total</b>	927	156	769	1852		
<b>Exactitud del usuario</b>	47.63	38.46	42.65			
<b>Error de comisión</b>	54.37	61.54	57.35			
					<b>Exactitud Global</b>	<b>43.79</b>
					<b>Kappa</b>	<b>0.155</b>

Para clasificación de vigor mediante del promedio del búfer del NDVI, se puede observar que el 22.8% fue clasificada como malo, mientras que solo el 3.4% se clasificó como vigor regular y el 17.6% como vigor bueno. Los rangos digitales de los valores promedios del NDVI para el vigor malo fue  $0.272 \pm 0.061$ , para el vigor regular fue de  $0.369 \pm 0.043$ , y el vigor bueno fue de  $0.504 \pm 0.106$  (Fig. 8b), estos valores fueron muy similares a los encontrados con solo un pixel. En matriz de confusión (Tabla 3), se puede observar que la exactitud de la clasificación (usuario) fue menor para el vigor malo 17.83% y 14.89% para vigor bueno, al contrario que para el vigor regular fue mayor en un 27.82%, representando el mayor error de omisión (89.87% de los individuos mal clasificados). La exactitud global fue de 43.79% y un valor kappa de 0.155.

**Tabla 3.** Matriz de confusión para evaluar vigor con valores promedio del búfer.

	Malo	Regular	Bueno	Total	Exactitud del producto	Errores de omisión
<b>Malo</b>	<b>422</b>	41	200	663	63.65	36.35
<b>Regular</b>	320	<b>63</b>	239	622	10.13	89.87
<b>Bueno</b>	179	62	<b>326</b>	567	57.50	42.50
<b>Total</b>	921	166	765	<b>1852</b>		
<b>Exactitud del usuario</b>	45.82	37.95	42.61			
<b>Error de comisión</b>	54.18	62.05	57.39			
					<b>Exactitud Global</b>	<b>43.79</b>
					<b>Kappa</b>	<b>0.155</b>

Con la información clasificada de los valores de mediana del búfer del NDVI se encontró que el 23.1% fue clasificada como vigor malo, mientras que el 3.0% se clasificó como vigor regular y el vigor bueno con una 17.5%. En cuanto al rango digital para el vigor malo fue  $0.275 \pm 0.062$ , para el vigor regular fue de  $0.372 \pm 0.042$ , y el vigor bueno fue de  $0.507 \pm 0.105$  (Figura 8c). Con esta información se extrajo de la matriz de confusión (Tabla 4), el comportamiento de la clasificación fue muy similar a la clasificación puntual del NDVI, la exactitud de las clases de vigor malo y bueno fue menor a la clasificación obtenida en campo en un 19.26 y 14.13% del total, de modo contrario, las plantas clasificadas como vigor regular fue mayor al obtenido en campo (exactitud del usuario) en un 28.33%, teniendo un error de omisión del 91%. La exactitud global fue de 43.63% y un valor kappa de 0.152.

**Tabla 4.** Matriz de confusión para evaluar vigor con valores mediana del búfer.

	Malo	Regular	Bueno	Total	Exactitud del producto	Errores de omisión
<b>Malo</b>	<b>428</b>	41	194	663	64.56	35.44
<b>Regular</b>	327	<b>56</b>	239	622	9.00	91.00
<b>Bueno</b>	190	53	<b>324</b>	567	57.14	42.86
<b>Total</b>	945	150	757	<b>1852</b>		
<b>Exactitud del usuario</b>	45.30	37.33	42.80			
<b>Error de comisión</b>	54.70	62.67	57.20			
					<b>Exactitud Global</b>	<b>43.63</b>
					<b>Kappa</b>	<b>0.152</b>

Por último, en la matriz de confusión (Tabla 5) donde se evalúa la clasificación del vigor de las plantas mediante el análisis de mayoría del búfer, se observó que el 21.5% fue clasificada como malo, mientras que el 4.2% se clasificó como vigor regular y el 15.2% fue clasificada con vigor bueno. Los valores digitales de la mayoría del búfer, para el vigor malo fue  $0.282 \pm 0.077$ , para el vigor regular fue de  $0.373 \pm 0.070$ , y el vigor bueno fue de  $0.502 \pm 0.112$  (Fig. 8d). La exactitud del usuario fue del 43.5, 39.58 y 34.36%, para el vigor malo, bueno y regular, respectivamente, del mismo modo que los análisis anteriores la clasificación del vigor malo fue subestimada en un 16.53%, y en menor medida el vigor bueno con un 9.98%, de modo contrario, el vigor regular fue sobreestimado en un 21.82%, lo que se refleja en la exactitud global de 40.87% y un valor kappa de 0.110.

**Tabla 5.** Matriz de confusión para evaluar vigor con valores de mayoría del búfer.

	Malo	Regular	Bueno	Total	Exactitud del producto	Errores de omisión
<b>Malo</b>	<b>398</b>	71	194	663	60.03	39.97
<b>Regular</b>	309	<b>78</b>	235	622	12.54	87.46
<b>Bueno</b>	208	78	<b>281</b>	567	49.56	50.44
<b>Total</b>	915	227	710	<b>1852</b>		
<b>Exactitud del usuario</b>	43.50	34.36	39.58			
<b>Error de comisión</b>	56.50	65.64	60.42			
					<b>Exactitud Global</b>	<b>40.87</b>
					<b>Kappa</b>	<b>0.110</b>

## DISCUSIÓN

Las especies utilizadas como son: *Zanthoxylum fagara* y *Acacia rigidula* presenta un alto estrés hídrico en los meses de diciembre-enero lo que dan la impresión de que se encuentra muertas, y tanto en campo como en la clasificación por medios espectrales es muy difícil diferenciar las muertas del vigor malo, lo que con lleva una baja precisión en la etapa de asignación de clase.

Existen varios datos atípicos (outlier) que se deben a las diversas condiciones del terreno, como son: las plantas están cubiertas por otras plantas más altas, existen áreas sin cubierta vegetal, y existen otras plantas que no fueron plantadas (regeneraron de manera natural), estas condiciones alteran los valores del NDVI, por lo tanto, contribuyen los errores de comisión, ubicando condiciones de vigor en campo mal clasificadas, que repercuten desde un 14.13% hasta un 28.33 % en la exactitud del producto de la clasificación.

La clasificación que menor exactitud obtuvo fue la realizada con la mayoría del búfer apenas alcanzó un 40.87%, que en comparación con el resto de los valores analizados resultó más bajo, fueron en promedio menores a 0.3%, además, los valores atípicos ninguno sobrepasa valores de 0.8, esto ocasiona que en promedio el 15% del vigor esté mal clasificada.

En general, la clasificación que mejor resultado obtuvo fue la generada a partir de pixel central del NDVI (43.79%), lo que sugiere que no es necesario hacer búfer para obtener información de la zona cercana donde se encuentra la planta debido a la ubicación de esta fue realizada con una GPS de buena precisión.

Las plantas clasificadas como vigor malo la precisión fue mayor al 21.5%, que es mejor a la clasificación sola de la sobrevivencia (viva o muerta, 17.0%). Cuando se clasificó el vigor

regular la precisión fue menor a 4.2%, lo que puede indicar que es una clase que tiene gran variabilidad posiblemente por la etapa fisiológica en la que se encuentran las diferentes especies que se evaluaron. La clase de vigor bueno apenas alcanzó el 17.5% en los diferentes tratamientos.

El vigor malo tuvo como promedio del valor digital de 0.226, 0.272, 0.275 y 0.282 en los diferentes tratamientos, los cuales se ubican dentro del rango espectral definido para las plantas muertas, esto se debe a las características fisiológicas de las plantas y a las características con las que se diferenciaron en campo esa condición, donde el menor indicio de que la planta estaba viva se consideraba como vigor malo, esta circunstancia hace difícil la diferenciación espectral del nivel digital del NDVI.

Los valores de kappa fueron similares en todas las clasificaciones con un 0.155 para valores puntuales del NDVI, y los valores promedios del búfer, 0.152 para los valores de mediana del búfer y el más bajo fue el de mayoría del búfer con un 0.110, lo que indica que la precisión es muy baja, aproximadamente un 30% de la exactitud es asumido por simplemente al azar.

Los rangos digitales del NDVI reportados para las plantas muertas en este estudio ( $0.266 \pm 0.053$ ) son similares a los encontrados por (Plaza Duarte, 2020), donde realizaron la evaluación de vigorosidad en plantaciones de teca (*Tectona grandis*), con valores menores a 0.2 indicaban árboles muertas o de poco vigor, ligeramente menor al promedio de este estudio (0.266). Para el vigor medio el rango fue de 0.2 a 0.3 y mayores a 0.3 con vigor alto, estos valores son menores a los encontrados en este estudio donde los valores aproximados de vigor regular fueron de 0.36, de la misma forma los valores de vigor bueno fueron mayor a 0.50. Otro estudio similar fue el realizado por (Estrada Zúñiga & Vásquez, 2021), en el cual identificaron *Parastrephia lepidophyllis* una especie arbustiva del Perú por medio NDVI, ubicada en el rango de 0.20 a 0.45, este rango fue muy similar a los obtenidos en este estudio. Un estudio en la India evaluaron diferentes cuatro tipos de bosque determinando rangos espectrales de NDVI clasificándolo con coeficiente de correlación de 0.638, un 10% más alto que el porcentaje obtenido en este estudio, dejando plasmado que la utilización de este tipo de índices (NDVI) para evaluar vegetación tiene correlaciones bajas (Prasad, V.K., Anuradha, E. & Badarinath, 2005).

Debido a que los estudios con sensores multiespectral montados en drones son de reciente incorporación para evaluar ecosistemas áridos y semiáridos es necesario hacer las comparaciones con estudios realizados con imágenes de satélite, por ejemplo, el realizado por (Hernández Ramos *et al.*, 2020) donde generaron modelos con la inclusión del NDVI para estimar peso verde y cobertura en *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. con coeficientes de correlación de 0.163 y 0.220, respectivamente, haciendo evidente que la clasificación de las especies de zonas áridas y semiáridas es difícil clasificar por medios espectrales.

En un estudio realizado por (Chemura *et al.*, 2017) monitorearon la sanidad en plantaciones de café utilizando NDVI con imágenes de satélite del sensor LandSat 8 OLI, encontraron una exactitud global de 68.1 %, valor superior a este estudio.

Algunos autores sugieren que la incorporación de otras bandas como el infrarrojo cercano o la banda del rojo aumenta la precisión para la detección de plantas vivas después de un incendio, alcanzando valores de coeficiente de correlación de 0.46 a 0.79 (White *et al.*, 2018).

Los resultados encontrados en este trabajo pueden ser pauta para nuevos estudios que puedan sentar las bases para evaluar el estado de vigorosidad de las plantaciones/reforestaciones en ecosistemas áridos y/o semiáridos del territorio nacional.

## CONCLUSIONES

Los sensores transportados por dron tienen potencial de ser usado para evaluar plantaciones forestales de especies mixtas en el matorral espinoso tamaulipeco. Esta evaluación mediante dron permite evaluaciones que puede ser utilizada para emprender acciones correctivas en las plantas basadas en la detección temprana de problemas. La metodología utilizada en este estudio permitió discriminar la plantas muertas y vivas con una exactitud global de 57.72% y se determinó con un 43.79% de precisión global el vigor de las plantas (malo, regular y bueno).

## LITERATURA CITADA

- Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V.M., Collantes-Chavéz-Costa, A., Buendía-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A., Sánchez-Castillo, L., A.-R. A. G. (2021). Structure, composition and carbon Stocks of woody plant community in assisted and unassisted ecological succession in a Tamaulipan thornscrub, Mexico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 94(6), 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40693-021-00102-6>
- Alanís Rodríguez, E., Molina Guerra, V. M., Rechy Palmeros, L., Alcalá Rojas, A. G., Marín Solís, J. D., & Pequeño Ledezma, M. Á. (2016). Composición, diversidad y sobrevivencia de un área restaurada en el Complejo Siderúrgico de Ternium, Pesquería, México. In E. Ceccon & C. Martínez-Garza (Eds.), *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas* (Primera ed, pp. 255–274). Universidad Autónoma de México, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [https://www.crim.unam.mx/web/sites/default/files/Experiencias\\_mexicanas.pdf](https://www.crim.unam.mx/web/sites/default/files/Experiencias_mexicanas.pdf)
- Almeida, D. R. A., Broadbent, E. N., Zambrano, A. M. A., Wilkinson, B. E., Ferreira, M. E., Chazdon, R., Meli, P., Gorgens, E. B., Silva, C. A., Stark, S. C., Valbuena, R., Papa, D. A., & Brancalion, P. H. S. (2019). Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79(March), 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.014>
- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138–146. <https://doi.org/10.1890/120150>
- Barbati, A., Corona, P., & Marchetti, M. (2007). A forest typology for monitoring sustainable forest management: The case of European Forest Types. *Plant Biosystems*, 141(1), 93–103. <https://doi.org/10.1080/11263500601153842>
- Cao, W.; Wu, J.; Shi, Y.; Chen, D. (2022). Restoration of Individual Tree Missing Point Cloud Based on Local Features of Point Cloud. *Remote Sensing*, 14(1346), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14061346>
- Castillo, D. D., Jara, C. A., Ricaurde, C. B., Vaca, B. E., & Quevedo, L. A. (2018). Photosynthetic activity and canopy height model determined by uav rgb and ir close-range remote-sensing in the high andean polylepis relict forest, Ecuador. *Bulletin of the Transylvania University of Braşov*, 11(60), 1–16. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58631769/Photosynthetic-with-cover-page-v2.pdf>
- Chemura, A., Mutanga, O., & Dube, T. (2017). Integrating age in the detection and mapping of incongruous patches in coffee (*Coffea arabica*) plantations using multi-temporal Landsat 8 NDVI anomalies. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 57, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.007>
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Tercera ed). RIAL.
- Congalton, R., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, Third Edition*. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- Doi, R. (2020). Assessing the reforestation effects of plantation plots in the Thai savanna based on 45 cm resolution true-color images and machine learning. *Environmental Research Letters*, 16(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcfe3>
- Estrada Zúñiga, A. C., & Vásquez, J. Ñ. (2021). Detection and identification of high Andean

**Recibido:**  
23/septiembre/2021

**Aceptado:**  
17/mayo/2022

- plant communities, Wetlands and Tolar de Puna Seca by means of RGB and NDVI orthophotos in “Unmanned Aerial Systems” drones. *Scientia Agropecuaria*, 12(3), 291–301. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.032>
- Gallardo-Salazar, J. L., Pompa-García, M., Aguirre-Salado, C. A., López-Serrano, P. M., & Meléndez-Soto, A. (2020). Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal. *Gallardo-Salazar, J. L., Pompa-García, M., Aguirre-Salado, C. A., López-Serrano, P. M., & Meléndez-Soto, A. (2020). Drones: Tecnología Con Futuro Promisorio En La Gestión Forestal. Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61), 27–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.794>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Quinta Ed.). Instituto de Geografía - UNAM. [http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo\\_siglo21/serie\\_lib/modific\\_al\\_sis.pdf](http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf)
- Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., Marshall, P. L., Tompalski, P., & Crawford, P. (2017). Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. *Forestry Chronicle*, 93(1), 71–81. <https://doi.org/10.5558/tfc2017-012>
- Hernández Ramos, A., Cano Pineda, A., Buendía Rodríguez, E., Tamarit Urias, J. C., & Hernández Ramos, J. (2020). Mapeo del peso verde y cobertura arbística de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. con datos espectrales del satélite Sentinel-2. In I. Orona Castillo, A. Amador Machado, J. Puentes Gutiérrez, M. Fortis Hernández, P. Preciado Rangel, & F. J. Ruiz Ortega (Eds.), *Memoria de la XXXII Semana Internacional de Agronomía* (1ra ed., pp. 1254–1260). Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia.
- Katila, P., Colfer, C. J. P., de Jong, W., Galloway, G., Pacheco, P., & Winkel, G. (2019). Sustainable development goals: Their impacts on forests and people. *Sustainable Development Goals: Their Impacts on Forests and People*, 1–617. <https://doi.org/10.1017/9781108765015>
- Pequeño-Ledezma, M., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O., González-Tagle, M. A., & Molina Guerra, V. M. (2016). Criterios a considerar para desarrollar proyectos de restauración ecológica. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(2), 94–105. <http://reibci.org/publicados/2016/jun/1600108.pdf>
- Plaza Duarte, H. (2020). *Niveles de vigorosidad de plantaciones de teca, (Tectona grandis), mediante índices de vegetación* [Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6288>
- Prasad, V.K., Anuradha, E. & Badarinath, K. V. S. (2005). Climatic controls of vegetation vigor in four contrasting forest types of India—evaluation from National Oceanic and Atmospheric Administration’s Advanced Very High Resolution Radiometer datasets (1990–2000). *Int J Biometeorol*, 50, 6–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00484-005-0268-0>
- Reed B., C., Schwartz M., D., & Xiao, X. (2009). Remote sensing phenology: Status and the way forward. In A. Noormets (Ed.), *Phenology of ecosystem processes* (pp. 231–246). Springer. [https://doi.org/10.1007/9781-4419-0026-5\\_10](https://doi.org/10.1007/9781-4419-0026-5_10)
- Samy Kharuf-Gutierrez, Luis Hernández-Santana, Rubén Orozco-Morales, O. de la C. A., & Díaz, I. D. M. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 39(2), 79–91. <http://scielo.sld.cu/pdf/eac/v39n2/eac07218.pdf>
- van Leeuwen, M., & Nieuwenhuis, M. (2010). Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129(4), 749–770. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0381-4>
- Wang, Q., Tenhunen, J., Dinh, N. Q., Reichstein, M., Vesala, T., & Keronen, P. (2004). Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland. *Remote Sensing of Environment*, 93(1–2), 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.006>
- White, R. A., Bomber, M., Hupy, J. P., & Shortridge, A. (2018). UAS-GEOBIA approach to sapling identification in jack pine barrens after fire. *Drones*, 2(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/drones2040040>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Prentice Hall.