



Evaluación de distintos sensores de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo de una plantación de *Pinus greggii* con fines de restauración ecológica

Evaluation of different sensors for unmanned aerial vehicles for monitoring a *Pinus greggii* plantation for ecological restoration purposes

Diana Santillán Gaona¹, José Luis Gallardo Salazar² , Cuauhtémoc Sáenz Romero³ , Roberto A. Lindig Cisneros^{4*} 

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Unidad San Juanito Itzicuaru. Av. San Juanito Itzicuaru s/n. Colonia Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58337.

³ Instituto de Investigaciones Sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. San Juanito Itzicuaru s/n. Colonia Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58337.

⁴ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

Historial

Manuscrito recibido: 29 de julio de 2024

Manuscrito aceptado: 25 de septiembre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Roberto A. Lindig Cisneros

e-mail: rlindig@iies.unam.mx

ORCID: 0000-0003-2542-7038

Resumen

En el campo de la restauración ecológica, una correcta evaluación de las plantaciones forestales es de gran importancia para determinar si se han cumplido las metas del proyecto. El objetivo del presente estudio fue monitorear esfuerzos de restauración temprana en sitios degradados mediante el uso de imágenes de alta resolución capturadas con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT). Se realizó una clasificación supervisada sobre dos ortomosaicos, uno construido con imágenes en el espectro visible (RGB por sus siglas en inglés) y otro con imágenes multiespectrales. Los datos obtenidos con cada imagen se compararon estadísticamente. La imagen RGB resultó mejor cuando se compararon los árboles vivos contra los árboles estresados y muertos. El uso de VANT es una opción viable para la evaluación temprana de plantaciones forestales.

Palabras clave: dron, supervivencia, evaluación, desempeño, reforestación.

Introducción

La evaluación de plantaciones forestales tanto con fines productivos como de restauración ecológica es de gran importancia para determinar si se cumplió con los objetivos planteados en cada proyecto (Nuzzo y Howell

Abstract

In the field of ecological restoration, a proper evaluation of forest plantations is of great importance to determine whether the project's goals have been met. The objective of this study was to monitor early restoration efforts in degraded sites using high-resolution images captured with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). A supervised classification was carried out on two orthomosaics, one constructed with red, green, and blue (RGB) images and the other with multispectral images. The data obtained from each image were statistically compared. The RGB image was better when comparing live trees against stressed and dead trees. The use of UAVs is a viable option for the early assessment of forest plantations.

Keywords: drone, survival, assessment, performance, reforestation.

1990; Ramírez *et al.*, 2015; Yoccoz *et al.*, 2001). Para el monitoreo, históricamente se han usado diversos métodos sobre el terreno que evalúan una variedad de aspectos del desempeño de las plantas, como la supervivencia y el crecimiento (Lindig-Cisneros, 2007), estas técnicas

pueden requerir de un esfuerzo considerable, limitando tanto el número de evaluaciones a lo largo del proyecto como del área que se puede trabajar. Una tecnología prometedora para hacer más eficiente este proceso son los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT).

El uso de VANT representa una oportunidad de innovación, ya que permite obtener información de alta resolución con capacidad de análisis de árboles individuales (Gallardo-Salazar *et al.*, 2021). Se ha aplicado para reconocer parámetros ecológicos para la detección temprana del estado fitosanitario, la determinación de las condiciones de fenología vegetal y síntomas de decaimiento y mortalidad forestal posiblemente atribuibles al cambio climático (Torresan *et al.*, 2017; Dash *et al.*, 2018; Brovkina *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2019), utilizando distintos tipos de sensores (Shin *et al.*, 2019; Webster *et al.*, 2018; Näsi *et al.*, 2018).

En este sentido, la literatura científica reporta el uso de diversos índices de vegetación, con aplicaciones recientes de los VANT (de Castro *et al.*, 2021). Dichos índices son aproximaciones del crecimiento, vigor y dinámica de la vegetación. De hecho, Ecke *et al.* (2022) reportaron la aplicación de VANT en el monitoreo de la salud forestal través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), calculado a partir de la banda del borde rojo, mostrando ser más sensible a los cambios fisiológicos en los pigmentos de las hojas de pinos. No se ha probado la utilidad de esta tecnología para la evaluación de plantaciones forestales en etapas tempranas, en particular en países megadiversos como México (Gallardo-Salazar *et al.*, 2020), por lo que en el presente estudio se probó la utilidad de los VANT para evaluar plantaciones a un año de establecidas por medio de dos sensores, visible y multiespectral y se compararon los resultados con evaluación en campo a través de evaluación visual y georreferenciación, con la finalidad de determinar si el uso de sensores es más eficaz para el monitoreo y cuál sensor (visible o multiespectral) es más adecuado.

Se espera que mediante imágenes de alta resolución del espectro visible y multiespectrales capturadas con drones, se logró diferenciar los árboles vivos, muertos o con algún nivel de estrés que fueron recientemente plantados en las parcelas. Ello bajo el supuesto de que los valores altos del índice de vegetación de diferencia normalizada en el follaje sano están asociados con la actividad fotosintética (Cristiano *et al.*, 2014; Gamon *et al.*, 2015), debido al contraste de la baja reflectancia de la hoja en la banda roja que ocurre con una mayor absorción de clorofila y una alta reflexión infrarroja dentro de la

capa de mesófilo esponjoso (Rullan-Silva *et al.*, 2013). Los valores de NDVI disminuyen con la senescencia del follaje, lo que se asocia con una mayor reflectancia en la banda roja (di Bella *et al.*, 2004; Chavana-Bryant *et al.*, 2017), de manera que esta tecnología pudiera ser una opción promisoriosa para la evaluación temprana de plantaciones forestales y monitoreo de esfuerzos de restauración en sitios degradados.

Materiales y métodos

El ejido Coro Grande está localizado en el noroeste del municipio de Morelia, Michoacán (19°45.7262'N 101°23.9480'W, **Figura 1**), a una altitud que va de los 2135 msnm a los 2325 msnm, y un área total de 1385.66 ha. La cobertura vegetal de la comunidad está dominada por agricultura de temporal (1035.53 ha); sin embargo, también está presente la agricultura de riego, bosque de encino con vegetación secundaria, matorral con vegetación secundaria, matorral, y, por último, pastizal inducido con matorral. El clima presente en la comunidad, según García y CONABIO (1998), es el templado, subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, así como una temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. Sin embargo, se pueden diferenciar dos tipos de precipitación dentro del área del polígono; una de ellas, y la que se encuentra en la gran mayoría de la superficie (94% de ésta), se caracteriza por una precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10% del total anual; mientras que el otro 6% le corresponde a aquella que cuenta con una precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

A finales del 2020, con la participación de los habitantes de la comunidad se cercó una parcela de 7.9 ha, ubicada en el sureste de la comunidad; esto con el propósito de evitar que el ganado bovino y equino que habita en la comunidad causara daños en la reforestación. En esta parcela se plantaron individuos de: *Pinus greggii*, *Leucaena leucocephala*, *Albizia plurijuga*, *Quercus spp.*, *Fraxinus udhei*, *Prosopis sp.* y *Agave cupreata*. En septiembre de 2021 se inició el monitoreo de los individuos de *Pinus greggii* porque para esta especie se contaba con un número adecuado de individuos agrupados en un área de 2,982.12 m² (**Figura 2**), registrando el estado del individuo (muerto, vivo o estresado), cada individuo fue georreferenciado con

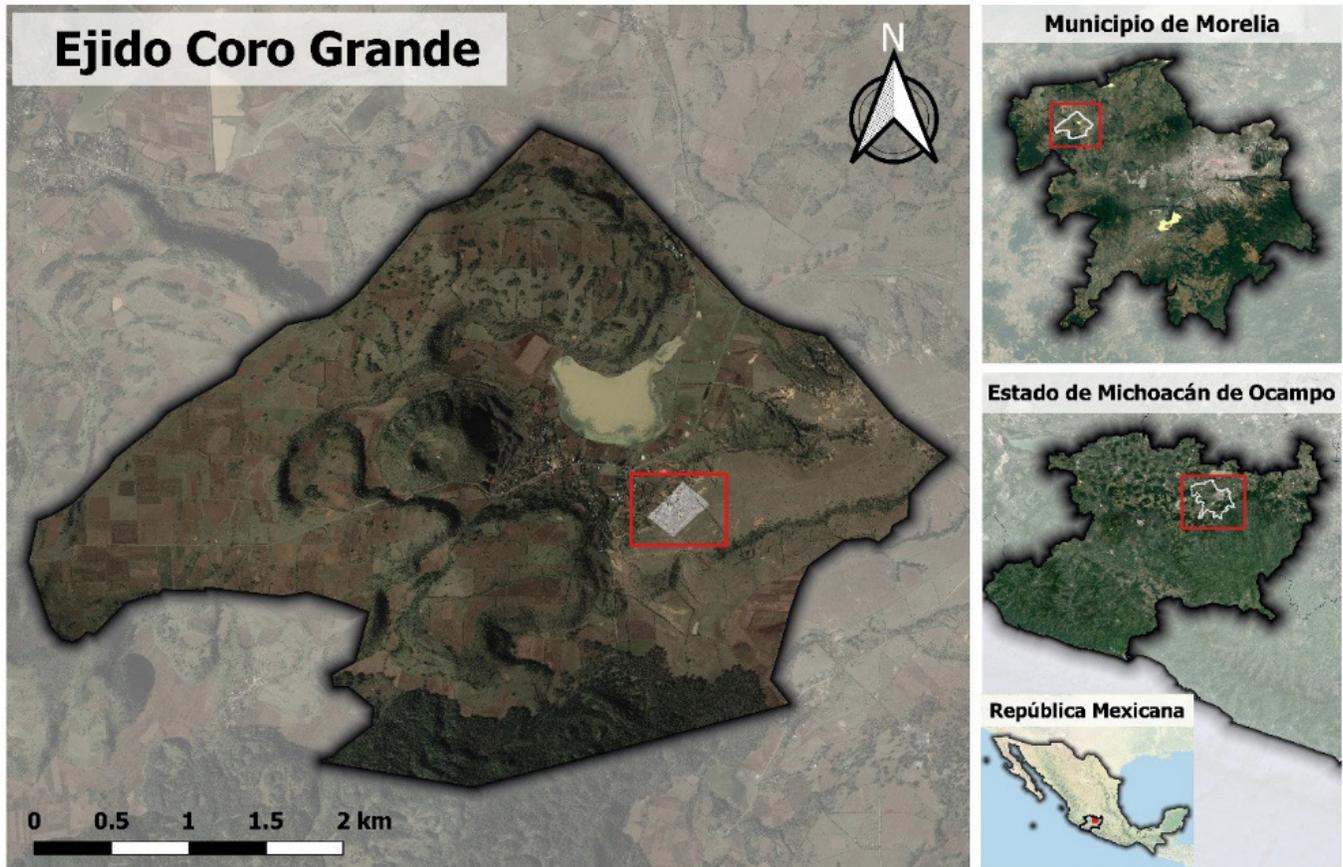


Figura 1. Ubicación del ejido Coro Grande y parcela de experimentación en el Municipio de Morelia, Michoacán (elaborado con imágenes de Google Earth® e imágenes propias de VANT).

un sistema de posicionamiento global (GPS). El día 9 de marzo del 2022 se llevó a cabo un conteo visual en terreno como parte del monitoreo antes mencionado, el tiempo empleado fue de 1.5 horas. Este conteo se llevó a cabo por uno de nosotros de manera independiente y los resultados no se compartieron con quien realizó la valoración visual en pantalla de las imágenes obtenidas con el sensor RGB y sensor multiespectral.

Para la obtención y procesamiento de imágenes de vehículos aéreos no tripulados, se utilizaron dos cuadricópteros de la marca Dà-Jiāng Innovations (DJI), modelos Phantom 4 Pro (P4P) y Phantom 4 Multiespectral (P4M). La cámara del P4P tiene un sensor de 1 pulgada con distancia focal de 24 mm y 20 MP, con sensores RGB (en el espectro de luz visible). Por su parte, el P4M tiene un total de seis sensores: cinco multiespectrales (ej. azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) y uno RGB, todos con un obturador global de 2 MP (**Tabla 1**). La distancia focal de la cámara del P4M es de 5.74 mm (P4 multiespectral, 2020). El P4M ha demostrado

una buena precisión, rendimiento y generación de datos consistentes comparado con otros modelos de cámaras multiespectrales (Lu *et al.*, 2020).

El P4P y el P4M operan bajo el principio de georreferenciación directa a bordo, al estar equipados con GPS que geoetiqueta con coordenadas para cada imagen adquirida. Esto indica que las imágenes adquiridas fueron georreferenciadas directamente por la capacidad GPS

Tabla 1. Información espectral de las bandas para el VANT DJI Phantom 4 Multiespectral (P4M).

Banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de longitud de onda (nm)
Azul	450	32
Verde	560	32
Rojo	650	32
Borde rojo	730	32
Infrarrojo cercano	840	52

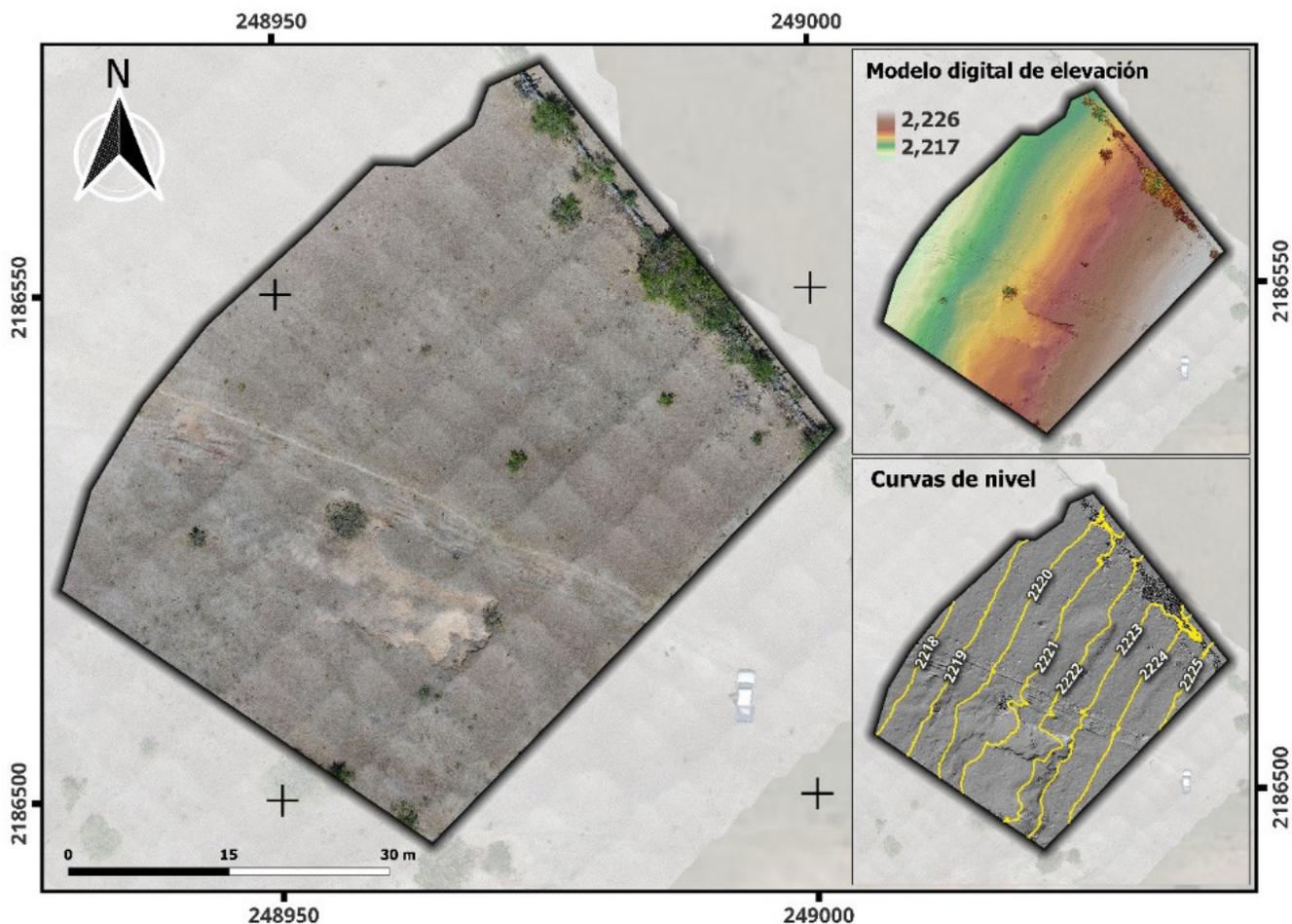


Figura 2. Parcela de experimentación para el análisis de *Pinus greggii* en el Ejido de Coro Grande, el sitio fue cercado para protegerlo del ganado. Se encuentra en una ladera con una pendiente moderada con orientación al noroeste.

durante la misión de vuelo (Syetiawan *et al.*, 2020). No fue necesario utilizar el sistema cinemático en tiempo real (RTK) debido a que el fabricante reporta que el sistema de georreferenciación puede alcanzar una precisión de ubicación vertical y horizontal de ± 0.1 y ± 0.3 m, respectivamente (P4 Multispectral Specs, 2020).

Las misiones de vuelo se ejecutaron el día 9 de marzo de 2022, lo que coincide con la temporada seca y cálida en esta región del país y tuvieron una duración de 22 minutos, a lo que se puede sumar el tiempo de programación del vuelo que fue de 10 minutos. Ello reúne características apropiadas para evaluar las condiciones de estrés de la reforestación y evitar interferencias y confusión en la imagen por la vegetación herbácea o arbustiva. El plan de vuelo para la adquisición automática de imágenes se programó con la aplicación Pix4DCapture (Pix4DCapture, 2022) para volar el P4P;

mientras que DJI Ground Station fue utilizada para el P4M (DJI Ground Station Pro., 2020). Los parámetros de vuelo fueron: traslape frontal y lateral de 80%, la altura de vuelo fue de 16 m sobre el nivel del suelo (AGL) con un ángulo de cámara de 90°. Los vuelos se realizaron en condiciones de sol y cielo despejado (sin nubes), lo más cerca posible del mediodía para evitar la interferencia de sombras, con velocidades del viento inferiores a 5 km/h.

Apartir de las imágenes RGB del P4P y multispectrales capturadas con el P4M, se aplicaron procedimientos fotogramétricos y de visión por computadora utilizando el software libre y de código abierto OpenDroneMap (ODM) (OpenDroneMap., 2022). Los resultados de ODM y las opciones comerciales son equiparables. Sin embargo, la licencia gratuita, múltiples opciones de personalización, disminución del tiempo de procesamiento y documentación disponible, hacen de

ODM una opción atractiva (Groos *et al.*, 2019). Este software implementa los algoritmos modernos *Structure from Motion* (SfM) y *Multi-View Stereo* (MVS), para estimar modelos 3D a partir de secuencias de imágenes 2D con un alto porcentaje de traslape (Deliry y Avdan, 2021) que se utilizan para construir un ortomosaico (Burdziakowski, 2017; Lee y Yu, 2018). Este proceso generó los ortomosaicos RGB, multiespectrales, modelos digitales de superficie y terreno del sitio de estudio.

A partir del ortomosaico multiespectral generado con las fotografías capturadas con el P4M, se calculó el NDVI, ello mediante la calculadora ráster de QGIS (Rosas-Chavoya *et al.*, 2022). El NDVI es uno de los índices más utilizados e implementados, calculado a partir de información multiespectral como relación normalizada entre las bandas roja e infrarroja cercana (Huang *et al.*, 2021). Matemáticamente, el NDVI se expresa de la siguiente manera:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

Dónde *NDVI* es el índice de vegetación de diferencia normalizado. *RED* y *NIR* es la respuesta espectral registrada con el P4M en las regiones roja (visible) e infrarroja cercana, respectivamente (Tabla 1). Los

valores de NDVI varían de -1 a 1, independientemente del uso de radiancia, reflectancia o DN como entrada. Para la clasificación de los árboles en las tres categorías se consideró que valores de 0.2 o menores corresponden a árboles muertos, de >0.2 a 0.5 árboles estresados y >0.5 árboles vivos.

El análisis estadístico para comparar la evaluación directa en campo y con el uso de VANT, se llevó a cabo con el registro de los individuos de *P. greggii* agrupados en las categorías vivo, muerto y estresado; siendo ejemplo de estas categorías los que se muestran en la **Figura 3**; para esto se realizó una prueba de χ^2 , así como una de equivalencia (Martín Andrés y Herranz Tejedor, 2004). En ambas pruebas se agruparon los datos en dos grupos: vivos vs. estresados + muertos; o vivos + estresados vs. muertos; esto con el propósito de identificar la diferencia que existe entre las distintas categorías de individuos que se identificaron tanto en observación directa en terreno y georreferenciando con GPS, como con los de interpretación visual en pantalla de los ortomosaicos generados con los sensores RGB y multiespectral de los VANT. En el caso de los análisis de equivalencia, según Frías-Navarro y colaboradores (2007), definir el valor de Delta (Δ o D) es una tarea compleja y constituye la principal dificultad en estas pruebas; esto debido a que

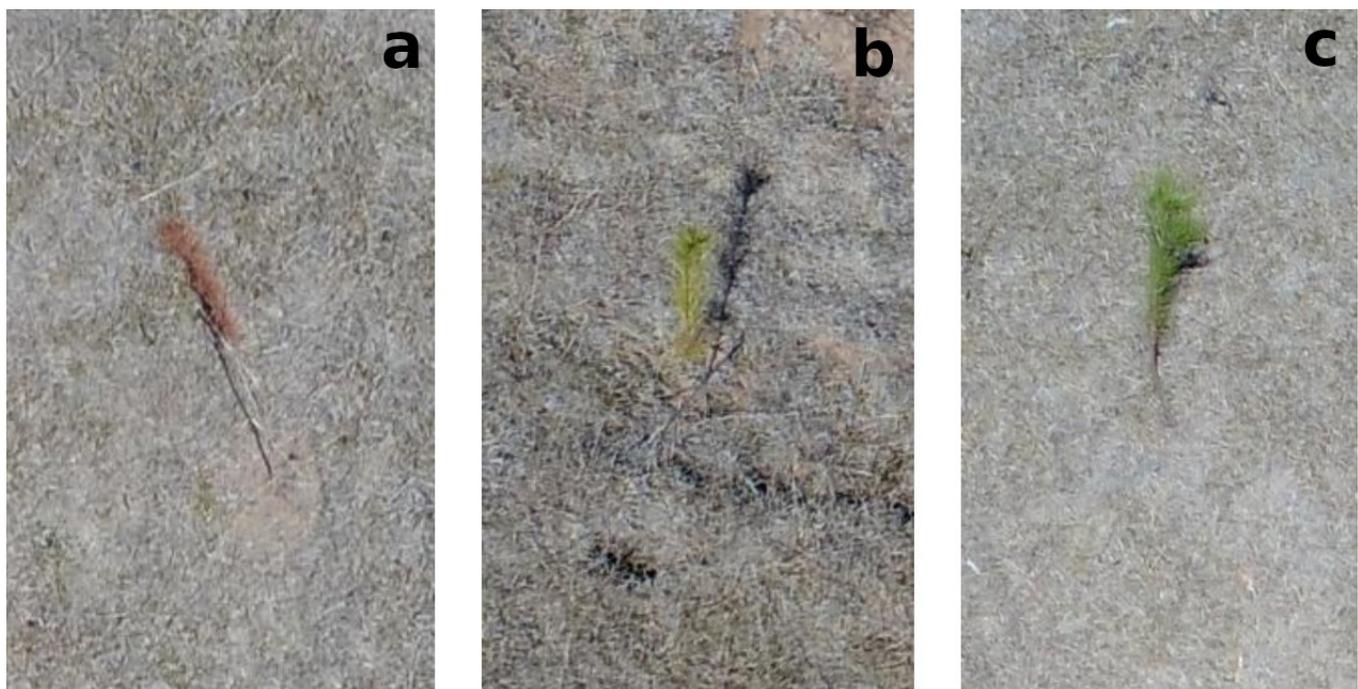


Figura 3. Categorías establecidas para los individuos de *Pinus greggii* estudiados: muerto (a), estresado (b) y vivo (c), con imágenes tomadas por el VANT como se describe en la sección de métodos (fotografías propias obtenidas con el detector RGB).

este valor se establece de acuerdo a la experiencia del investigador, tomando en cuenta que se define como la diferencia máxima entre los grupos que es aceptable en función del fenómeno estudiado (Frías-Navarro, 2007). Sin embargo, otros autores como Röhmel (2001), mencionan que los valores más usuales para Δ en estas pruebas son de 0.05, 0.10, 0.15 y 0.20; de tal forma, por lo que se consideraron estos valores de Δ .

Resultados y discusión

De acuerdo a las categorías descritas anteriormente, observadas en el censo realizado tanto en campo, como en las imágenes de distintos sensores en vehículos aéreos no tripulados, se obtuvieron los resultados que se muestran en la **Tabla 2**. El método que arrojó mayor número de individuos, 209 en total, fue el VANT con sensor RGB, seguido del VANT multiespectral y, finalmente, la evaluación visual en terreno con georreferenciación (GPS), habiendo una diferencia de 6 individuos únicamente entre ellas. Por otro lado, con todos los métodos utilizados se identificaron más individuos vivos que de las otras categorías (muertos y estresados). Con el VANT multiespectral se identificaron una mayor cantidad de individuos estresados (63), habiendo entonces una diferencia de 29 y 39 individuos con los otros dos métodos, siendo que entre el VANT RGB y el GPS solamente hubo 10 individuos de diferencia. Se calculó el NDVI de los individuos detectados con el sensor multiespectral, los resultados indican que, para los individuos muertos, el valor promedio fue de 0.144, para los estresados de 0.3792 y para los vivos de 0.5504 (**Figura 4**).

Desde una perspectiva de la distribución de los individuos de las diferentes categorías, se observó que los individuos muertos, se agrupan en el oeste del sitio reforestado, zona que además es la más cercana a cárcavas de gran tamaño localizadas dentro de la parcela de experimentación. Por otro lado, los individuos registrados como estresados y vivos, observados con los tres métodos utilizados, se encuentran distribuidos homogéneamente por toda la zona reforestada. En la **Figura 5**, se puede apreciar que el patrón es similar independientemente del tipo de detección.

En la **Tabla 3**, se compara el censo en el terreno (GPS) y el VANT RGB, y se puede apreciar que agrupando los árboles vivos con los estresados y

Tabla 2. Resultados de individuos identificados con GPS, VANT RGB y VANT multiespectral.

Método	Vivo	Estresado	Muerto	Total
VANT RGB	116	34	59	209
VISUAL EN CAMPO (GPS)	98	24	81	203
VANT Multiespectral	82	63	59	204

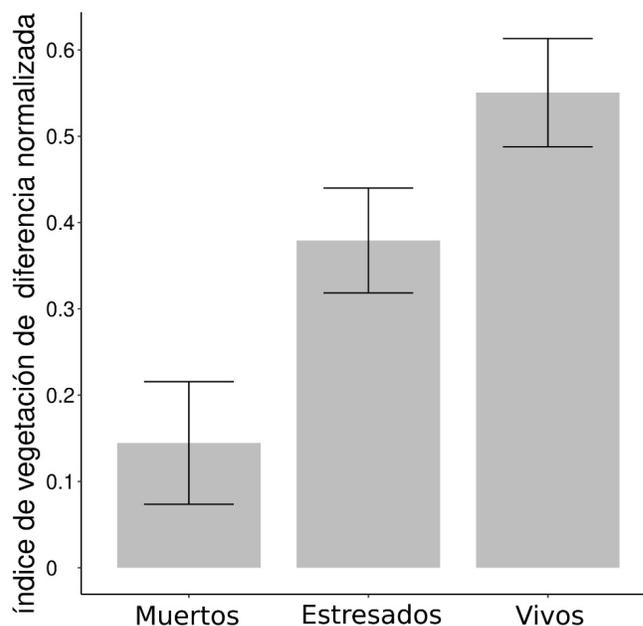


Figura 4. NDVI por categoría para los individuos detectados con el sensor multiespectral, los datos son medias y desviación estándar (tamaños de muestra: muertos = 59, estresados = 63, vivos = 82).

comparando a estos dos con los muertos la diferencia es estadísticamente significativa; agrupando los muertos y estresados y comparando con los vivos la diferencia no es significativa y las pruebas de equivalencia indican que para este último agrupamiento se puede considerar a los dos grupos equivalentes con un valor de Δ de 0.15.

Cuando se compara el censo en el terreno (GPS) y el VANT con sensor multiespectral (**Tabla 4**), es significativa la diferencia cuando se agrupan los árboles vivos con los estresados y comparando con los muertos. Al igual que con el sensor RGB, agrupando los muertos y estresados y comparando con los vivos, la diferencia no es significativa y las pruebas de equivalencia indican que para este último agrupamiento se puede considerar a los dos grupos equivalentes con un valor de Δ de 0.20.

Tabla 3. Comparación entre GPS y sensor RGB. En las pruebas de equivalencia no significativo (N.S.) indica que la diferencia entre las medias está fuera del intervalo de equivalencia indicado (Δ).

Comparación	χ^2	$\Delta=0.05$	$\Delta=0.10$	$\Delta=0.15$	$\Delta=0.20$
Vivos vs. Muertos+Estresados	0.1709	N.S.	N.S.	0.0552	0.0041
Vivos+Estresados vs. Muertos	0.01655	N.S.	N.S.	N.S.	0.0357

Tabla 4. Comparación entre GPS y sensor multiespectral. En las pruebas de equivalencia no significativo (N.S.) indica que la diferencia entre las medias está fuera del intervalo de equivalencia indicado (Δ).

Comparación	χ^2	$\Delta=0.05$	$\Delta=0.10$	$\Delta=0.15$	$\Delta=0.20$
Vivos vs. Muertos+Estresados	0.1233	N.S.	N.S.	N.S.	0.0068
Vivos+Estresados vs. Muertos	0.02594	N.S.	N.S.	N.S.	0.0265

Tabla 5. Comparación entre VANT con sensor RGB y multiespectral. En las pruebas de equivalencia no significativo (N.S.) indica que la diferencia entre las medias está fuera del intervalo de equivalencia indicado (Δ).

Comparación	χ^2	$\Delta=0.05$	$\Delta=0.10$	$\Delta=0.15$	$\Delta=0.20$
Vivos vs. Muertos+Estresados	0.0026	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Vivos+Estresados vs. Muertos	0.9628	N.S.	0.0101	0.0004	0

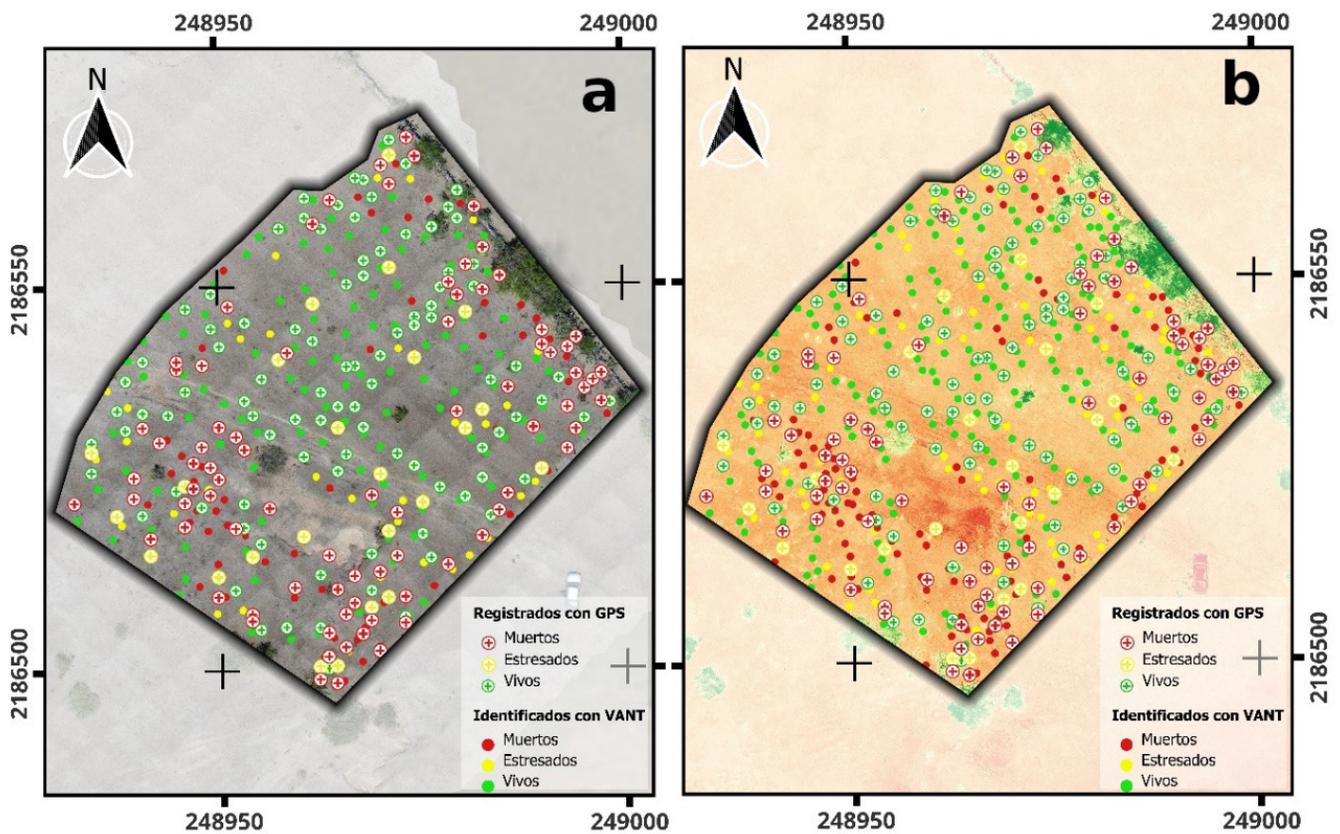


Figura 5. Agrupación de los individuos por categorías según el método utilizado. (a) individuos registrados con GPS en el terreno e individuos identificados con el VANT con sensor del espectro visible (RGB); (b) individuos registrados con GPS en el terreno e individuos identificados con el VANT con sensor multiespectral.

Finalmente, si se comparan los dos sensores de VANT, se puede apreciar que si se agrupan muertos y estresados y se compara con los vivos la diferencia es estadísticamente significativa, pero si se agrupan los vivos y estresados y se compara con los muertos los valores son equivalentes con una Δ de 0.10.

Los datos anteriores indican que los datos obtenidos con cualquiera de los sensores utilizados son equivalentes con lo observado en terreno cuando se comparan los árboles vivos en buen estado contra los árboles estresados y muertos. En términos del desempeño observado, cabe mencionar que éste es similar a lo reportado en otros ensayos en el Estado de Michoacán para esta especie (Gómez-Romero, 2012).

Conclusiones

La diferencia entre el número de individuos registrados a través de la evaluación visual en terreno con los sensores RGB y multiespectral lo atribuimos a que, cuando se hace una evaluación visual en terreno, pueden cometerse errores de conteo que solamente se pueden corregir realizando varios recorridos y marcando los árboles, lo que en muchos casos no es posible por falta de recursos y/o tiempo. El hecho de que las imágenes obtenidas con el VANT se pueden analizar más detalladamente a posteriori hace que sea más confiable la información. Es alentador que el uso de sensores RGB y multiespectral sea equivalente, dado que el primero es de menor costo que el segundo. El tiempo requerido para la evaluación con VANT fue de aproximadamente un tercio del tiempo que requirió la evaluación en campo, y es de esperarse que la diferencia sea mayor si el área a evaluar es mayor o de más difícil acceso. El uso de VANT para la evaluación temprana de plantaciones forestales es una herramienta prometedora considerando que esta tecnología ha reducido sus costos en los últimos años y que se pueden adquirir modelos económicos con detectores en el rango visible, sobre todo si es necesario evaluar un gran número de parcelas reforestadas y/o de una gran extensión.

Referencias

Brovkina O, Cienciala E, Surový P, y Janata P (2018). Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands. *Geo-Spatial Information Science* 21(1):12–20. doi:10.1080/10095020.2017.1416994.

Burdziakowski P (2017). Evaluation of open drone map toolkit for geodetic grade aerial drone mapping--case study. <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/evaluation-of-open-drone-map-toolkit-for-geodetic-grade-aerial-drone-mapping-case-study,141843-1>

Chavana-Bryant C, Malhi Y, Wu J, Asner GP, Anastasiou A, Enquist BJ, Cosio Caravasi EG, Doughty CE, Saleska SR, Martin RE, Gerard FF (2017). Leaf aging of Amazonian canopy trees as revealed by spectral and physiochemical measurements. *The New Phytologist* 214(3):1049–1063. doi:10.1111/nph.13853.

Cristiano PM, Madanes N, Campanello PI, Di Francescantonio D, Rodríguez SA, Zhang Y-J., Carrasco LO, Goldstein G (2014). High NDVI and Potential Canopy Photosynthesis of South American Subtropical Forests despite Seasonal Changes in Leaf Area Index and Air Temperature. *Forests, Trees and Livelihoods* 5(2):287–308. doi:10.3390/f5020287.

de Castro AI, Shi Y, Maja JM, Peña JM (2021). UAVs for Vegetation Monitoring: Overview and Recent Scientific Contributions. *Remote Sensing* 13(11):2139. doi:10.3390/rs13112139.

Deliry SI, Avdan U (2021). Accuracy of unmanned aerial systems photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping: A review. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 49(8):1997–2017. doi:10.1007/s12524-021-01366-x.

Di Bella CM, Paruelo JM, Becerra JE, Bacour C, Baret F (2004). Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: Experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing* 25(23):5415–5427. doi:10.1080/1431160412331269724.

DJI Ground Station Pro (2020). <http://www.dji.com/mx/ground-station-pro>.

Ecke S, Dempewolf J, Frey J, Schwaller A, Endres E, Klemmt H-J., Tiede D, Seifert T (2022). UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing* 14(13):3205. doi:10.3390/rs14133205

Feduck C, McDermid GJ, Castilla, G (2018). Detection of Coniferous Seedlings in UAV Imagery. *Forests, Trees and Livelihoods* 9(7):432. doi:10.1016/j.isrjsjprs.2020.08.005.

Frías-Navarro D, Pascual J, Monter-Bort H, Gracia-Pérez F (2007). Test de equivalencia. En DeLaFuente E, Padilla J, Gracia J (eds). *Actas IX Congreso de Metodología de las Ciencias Sociales y de la Salud*, 390-403. Granada: Ediciones Sider S.C. https://www.researchgate.net/publication/303855897_Tests_de_Equivalencia.

- Gallardo-Salazar JL, Pompa-García M (2020). Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322020000500027yscript=sci_arttext.
- Gallardo-Salazar JL, Carrillo-Aguilar DM, Pompa-García M, Aguirre-Salado CA (2021). Multispectral indices and individual-tree level attributes explain forest productivity in a pine clonal orchard of Northern Mexico. *Geocarto International* 37(15):4441-4453. doi:10.1080/10106049.2021.1886341.
- Gamon JA, Kovalchuk O, Wong CY S., Harris A, Garrity SR (2015). Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences Discussions* 12(3):2947–2978.
- García E (1998). Climas, escala 1000000: México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Mexico. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yesy_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no.
- Gómez-Romero M, Soto-Correa JC, Blanco-García JA (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000800005.
- Groos AR, Bertschinger TJ, Kummer CM, Erlwein S, Munz L, Philipp A, 2019, The Potential of Low-Cost UAVs and Open-Source Photogrammetry Software for High-Resolution Monitoring of Alpine Glaciers: A Case Study from the Kanderfirn (Swiss Alps). *Geosciences Journal* 9(8):356. doi:10.3390/geosciences9080356.
- Huang S, Tang L, Hupy JP, Wang Y, Shao G (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Research Journal of Forestry* 32(1):1–6. doi:10.1007/s11676-020-01155-1.
- Jiao W, Wang L, McCabe MF (2021). Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sensing of Environment* 256:112313. doi:10.1016/j.rse.2021.112313
- Lee S, Yu B-H (2018). Automatic detection of dead tree from UAV imagery. *Proceedings of the 39th Asian Conference on Remote Sensing, Kuala Lumpur, Malaysia* 15–19.
- Lin Q, Huang H, Wang J, Huang K, Liu Y (2019). Detection of Pine Shoot Beetle (PSB) Stress on Pine Forests at Individual Tree Level using UAV-Based Hyperspectral Imagery and Lidar. *Remote Sensing* 11(21):2540. doi:10.3390/rs11212540
- Lindig Cisneros RA (2017). *Ecología de restauración y restauración ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia.
- Lu H, Fan T, Ghimire P, Deng L (2020). Experimental Evaluation and Consistency Comparison of UAV Multispectral Minisensors. *Remote Sensing* 12(16):2542. doi:10.3390/rs12162542.
- Martín Andrés A, Herranz Tejedor I (2004). The Equivalence of Two Proportions Revisited. *Journal of Applied Statistics* 31(1):61–72. doi:10.1080/0266476032000148957.
- Meddens AJ H., Hicke JA, Vierling LA, Hudak AT (2013). Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 132:49–58. doi:10.1016/j.rse.2013.01.002
- Multispectral Specs. (2020). <https://www.dji.com/p4-multispectral/specs>.
- Näsi R, Honkavaara E, Blomqvist M, Lyytikäinen-Saarenmaa P, Hakala T, Viljanen N, Kantola T, Holopainen M (2018). Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban Forestry and Urban Greening* 30:72–83. doi:10.1016/j.ufug.2018.01.010.
- Nuzzo VA, Howell EA (1990). Natural area restoration planning. *Natural Areas Journal* 10(4):201–209. ISSN: 0885-8608.
- OpenDroneMap (2022). <http://www.opendronemap.org/P4>.
- Pix4DCapture (2022). <https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dcapture>.
- Ramírez W, Aguilar-Garavito M, Calle Z, Cabrera M (2015). Introducción al monitoreo en la restauración ecológica. En Aguilar-Garavito M, Ramírez W (editores). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9281>.
- Reis BP, Martins SV, Fernandes Filho EI, Sarcinelli TS, Gleriani JM, Leite HG, Halassy M (2019). Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images. *Ecological Engineering* 127:178–186. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.11.022.
- Röhm J (2001). Statistical considerations of FDA and CPMP rules for the investigation of new anti-bacterial products. *Statistics in Medicine* 20(17-18):2561–2571. doi:10.1002/sim.729.

Rosas-Chavoya M, Gallardo-Salazar JL, López-Serrano PM, Alcántara-Concepción PC, León-Miranda AK (2022). QGIS a constantly growing free and open-source geospatial software contributing to scientific development. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 48(1):197–213. <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/5143>.

Shin J-I, Seo W-W, Kim T, Park J, Woo C-S (2019). Using UAV Multispectral Images for Classification of Forest Burn Severity—A Case Study of the 2019 Gangneung Forest Fire. *Forests, Trees and Livelihoods* 10(11):1025. doi:10.3390/fl0111025.

Syetiawan A, Gularso H, Kusnadi GI, Pramudita GN (2020). Precise topographic mapping using direct georeferencing in UAV. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 500(1):012029.

Torresan C, Berton A, Carotenuto F, Di Gennaro SF, Gioli B, Matese A, Miglietta F, Vagnoli C, Zaldei A, Wallace L (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing* 38(8-10):2427–2447. doi:10.1080/01431161.2016.1252477.

Webster C, Westoby M, Rutter N, Jonas T (2018). Three-dimensional thermal characterization of forest canopies using UAV photogrammetry. *Remote Sensing of Environment* 209:835–847. doi:10.1016/j.rse.2017.09.033.

Yoccoz NG, Nichols JD, Boulinier T (2001). Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* 16(8):446–453. doi:10.1016/S0169-5347(01)02205-4.