



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.794>

Artículo

Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal Drones: technology with a promising future in forest management

José Luis Gallardo-Salazar¹, Marín Pompa-García^{1*}, Carlos Arturo Aguirre-Salado²,
Pablito Marcelo López-Serrano³ y Arnulfo Meléndez-Soto¹

Abstract

Climate variability points out important challenges that forest ecosystems are currently facing. In order to better understanding their vital processes, it is necessary to have cutting-edge technologies and unmanned aerial vehicles (UAV) play a fundamental role. Its applications have been extended to civilian use, natural disaster response, humanitarian action, and earth science research. Although UAV have been used for different tasks and services, there is a lack of information on the state of the art of methods, uses and trends in forest management. This paper contributes to knowledge in terms of research volume over time, differentiated by journals and countries; most influential papers and authors; scientific collaboration networks; types of vegetation and fields of study; hardware and software that are relevant for forest monitoring. The results showed 117 scientific papers published from 2012 to 2019, mainly in China and USA including five clusters of scientific collaborations. The studies focused on individual attributes of forest structure, inventories, and vigor forest monitoring. Also, temperate forests were mostly studied around the world. The rotorcrafts drones were the most used with RGB sensor from DJI as the dominant market leader. Photoscan was the photogrammetry software more applied on forestry research. Lastly, we confirm that UAV are exponentially expanding over the last five years. In Mexico, this potential is expected to increase, taking advantage of its mega diversity, great forestry tradition and the researchers that are becoming specialized.

Key words: Bibliographic database, bibliometrics, forestry studies, forest resources, photogrammetry software, unmanned aerial vehicles.

Resumen

La variabilidad climática plantea importantes retos que actualmente enfrentan los ecosistemas forestales. Para mejorar el entendimiento de sus procesos vitales es necesario contar con tecnologías de vanguardia, una de los cuales son los vehículos aéreos no tripulados (VANT) que desempeñan un papel fundamental. Si bien, los VANT se han usado para diferentes tareas y servicios; existe un vacío de información sobre el estado del arte de los enfoques, usos y tendencias en la gestión forestal. Este estudio es una aportación al conocimiento, en términos de volumen de investigación a través del tiempo; diferenciada por revistas y por países; artículos y autores más influyentes; redes de colaboración científica; tipos de vegetación y campos de estudio; *hardware* y *software* relevante utilizado. Los resultados mostraron 117 artículos científicos publicados del 2012 al 2019, principalmente de China y Estados Unidos de América, y cinco clústeres de colaboración científica. Los estudios se enfocaron, principalmente, en los atributos individuales de la estructura forestal, inventarios y monitoreo del vigor forestal. Los bosques templados fueron los ecosistemas más estudiados alrededor del mundo, mientras que los drones de multirrotor los más usados con el sensor RGB de DJI como la marca líder dominante. El *Photoscan* fue el programa fotogramétrico más aplicado en investigación forestal. Por último, se confirma que el uso de los VANT se ha expandido exponencialmente en el último lustro. En México, se prevé que dicho potencial se incremente, a partir de su megadiversidad, gran tradición forestal y los investigadores que están especializándose en el tema.

Palabras clave: Base de datos bibliográfica, bibliometría, estudios forestales, recursos forestales, *software* fotogramétrico, vehículos aéreos no tripulados.

Fecha de recepción/Reception date: 8 de junio de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 4 de agosto de 2020

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

³Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

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

Introducción

Los efectos de la variabilidad climática en los ecosistemas forestales y las capacidades de plasticidad de la vegetación confieren la necesidad de monitorear los procesos ecológicos que ahí ocurren. Por ejemplo, el cambio climático a través de variaciones extremas y continuas ha impactado en la biogeografía de la vegetación (Ackerly *et al.*, 2010), variaciones fenológicas (Piao *et al.*, 2019), signos de decaimiento (Gustafson y Sturtevant, 2013) y cambios en las tasas de productividad (García-Valdés *et al.*, 2020). Estas consecuencias de vulnerabilidad evidencian la necesidad de generar información de mayor calidad y conocimiento que mejore el entendimiento de los mecanismos ecológicos que enfrentan las plantas.

En años recientes, la comunidad científica ha emprendido diversos esfuerzos enfocados a contribuir al desarrollo de la ciencia forestal. Un notable ejemplo lo constituye la aplicación de los sensores remotos ligados a variables dendroecológicas para explicar los cambios del crecimiento forestal (Babst *et al.*, 2018; Vicente-Serrano *et al.*, 2016). Así, en la búsqueda de refinar el conocimiento a escalas espaciales de mayor resolución y precisión, la literatura científica registra un desarrollo vertiginoso en tecnologías como los VANT (vehículos aéreos no tripulados), UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*, por sus siglas en inglés), RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*, por sus siglas en inglés), o comúnmente llamados drones (ICAO, 2011). Colomina y Molina (2014) los definen como sistemas completos integrados por el vehículo aéreo no tripulado, la estación de control en tierra y el enlace de datos de comunicación. Aunado a ello, para aplicaciones de fotogrametría y teledetección estas plataformas deben acompañarse con cámaras de banda visible, del infrarrojo cercano, multiespectral, hiperespectral, térmico, láser o radar de apertura sintética.

Sin embargo, a pesar de su creciente utilización (Salamí *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2019), aún existen vacíos de información sobre la situación, tendencias y áreas de oportunidad de aplicación en estudios forestales. Además, la flexibilidad, dinamismo y diversidad de estas tecnologías geoespaciales hace imperativo su estudio continuo (Beloev, 2016). Consecuentemente, documentar y sistematizar el estado del arte sobre los principales enfoques, usos y tendencias de los VANT en los

estudios científicos forestales contribuirá a potenciar los alcances en algunas líneas de investigación forestal, al usar esta plataforma (Gambella *et al.*, 2016).

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue realizar un análisis sobre la perspectiva que ofrecen los drones aplicados en estudios forestales alrededor del mundo, por medio de una revisión exhaustiva de literatura para generar un diagnóstico situacional y áreas de oportunidad, como herramienta que ayude a seleccionar mejores parámetros para explicar los procesos ecológicos subyacentes a la dinámica de los ecosistemas.

Métodos y criterios de búsqueda

El estudio se enfocó en la revisión de artículos científicos que abordan el uso de VANT con sensores pasivos (cámaras RGB, termales, multiespectrales e hiperespectrales) en investigaciones forestales. Se realizó una búsqueda en el repositorio científico *Scopus* (<https://www.scopus.com>), debido a que diversos autores lo describen con ventajas (mayor número de revistas, documentos y citas) sobre otras bases de datos científicas (Granda-Orive *et al.*, 2013; AlRyalat *et al.*, 2019). El proceso de búsqueda comprendió el periodo de 2012 a 2019 con las palabras clave "UAV", *forest* y *forestry*.

Se excluyeron los trabajos pertenecientes a la llamada "literatura gris" (tesis, memorias de congresos, folletos técnicos, etcétera), ya que esos no están sujetos a revisiones de arbitraje estricto, o no se ajustan a normas de control bibliográfico e índices de impacto.

Con la base de datos descargada de *Scopus*, se llevó a cabo un análisis de coautoría y redes de colaboración científica, mediante el *software VOSviewer*, y se consideró como mínimo dos contribuciones por autor (Van y Waltman, 2019). Este análisis ha mostrado su alta eficiencia en estudios similares (Martínez-Santiago *et al.*, 2017).

Posteriormente, se capturó la información de los artículos científicos revisados y se sistematizó en una hoja de cálculo con los siguientes campos: referencia, año de publicación, título del artículo, revista, factor de impacto, número de citas, tasa anual de citas, número de autores, número de instituciones involucradas, país del

autor por correspondencia, objetivo del estudio, campo de conocimiento, tamaño del área de estudio, vegetación y uso de suelo, clima, tipo de VANT, modelo, tipo de sensor, resolución espacial, altura de vuelo y *software* fotogramétrico utilizado. Los datos se agruparon y clasificaron con el fin de facilitar la elaboración de cuadros y gráficas comparativas para cumplir con la finalidad del presente estudio.

Artículos publicados a través del tiempo y revistas con más publicaciones

La búsqueda arrojó 229 artículos en total, los cuales se filtraron para seleccionar 177 relacionados con el objetivo principal de la presente investigación (material complementario en <https://cutt.ly/GrVZRmf>). Los artículos considerados se publicaron de 2012 a 2019. Se observa que a partir de 2015, el aumento promedio de documentos publicados por año fue de 15.5. El año con más publicaciones fue 2019; sin embargo, el mayor incremento respecto al año anterior se registró en 2018 (Figura 1).

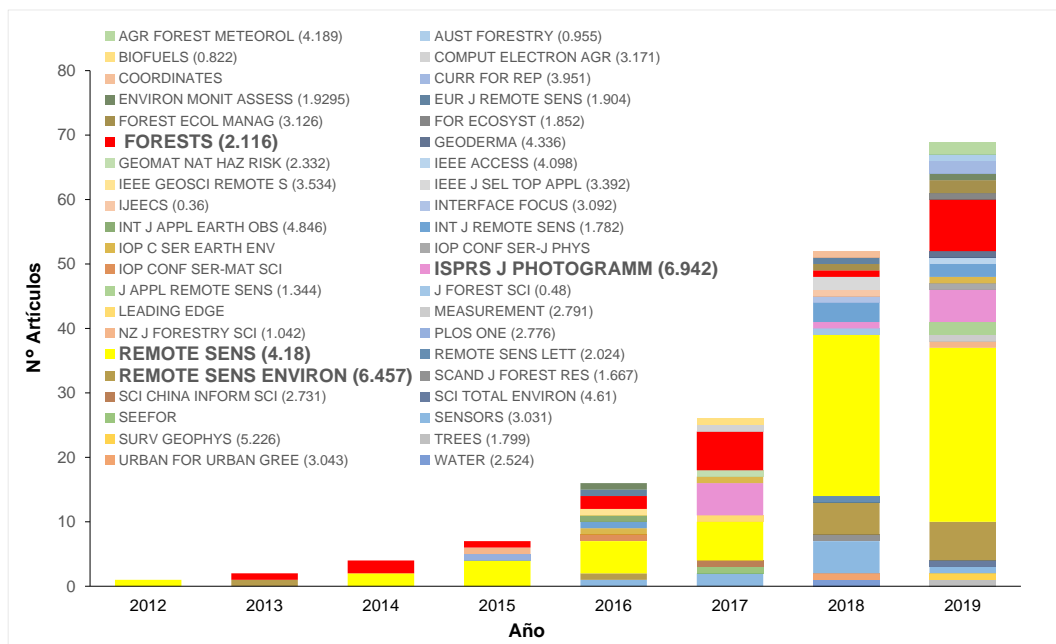


Figura 1. Artículos publicados sobre estudios forestales que utilizaron VANT agrupados por año de publicación, revista y factor de impacto.

La tendencia puede explicarse por el creciente mercado de los VANT en los últimos años. Los estudios de mercado proyectaron una detonación del crecimiento a partir de 2013; se estimaron USD\$ 19.3 billones en 2019 y se prevén 45.8 billones USD para 2025 (Markets and Markets, 2019).

Aunado a lo anterior, Colomina y Molina (2014) informaron que el desarrollo de los VANT se triplicó de 2005 a 2014. Además, se observó un aumento relevante en el tipo de plataformas civiles / comerciales, especialmente en 2012 y 2013, categoría a la que pertenecen los VANT utilizados en los estudios forestales con sensores que proporcionan imágenes de alta resolución.

Por otro lado, los 177 estudios analizados estuvieron distribuidos en 45 revistas científicas. Destacan *Remote Sensing* y *Forest* con 70 y 21 artículos publicados, respectivamente; que en suma representan 51 % de todos los artículos analizados. Las revistas con mayor factor de impacto son *Remote Sensing of Environment* e *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* con 6.457 y 6.942, respectivamente; las cuales ocupan el tercero y cuarto lugar de las revistas con más publicaciones en el tema (Figura 1).

Remote Sensing lidera el número de publicaciones, lo que es congruente con su enfoque editorial. Es una revista especializada, que publica los avances más vanguardistas en materia de tecnologías de percepción remota; su periodicidad semimensual, su alta visibilidad y rápida publicación parecen atraer a los investigadores de la materia. Igualmente, *Forest* es también una de las revistas más atractivas para la comunidad científica en el ámbito forestal, ya que su eficiencia en el proceso editorial y su factor de impacto constituyen una ventaja que los científicos parecen aprovechar.



Artículos más citados

Se calculó la tasa anual de citas de cada artículo y se agruparon en seis clases. Un total de 120 artículos presentaron de 0 a 5 citas por año y solo 10 artículos, más de 20 citas al año (Figura 2 y Cuadro 1).

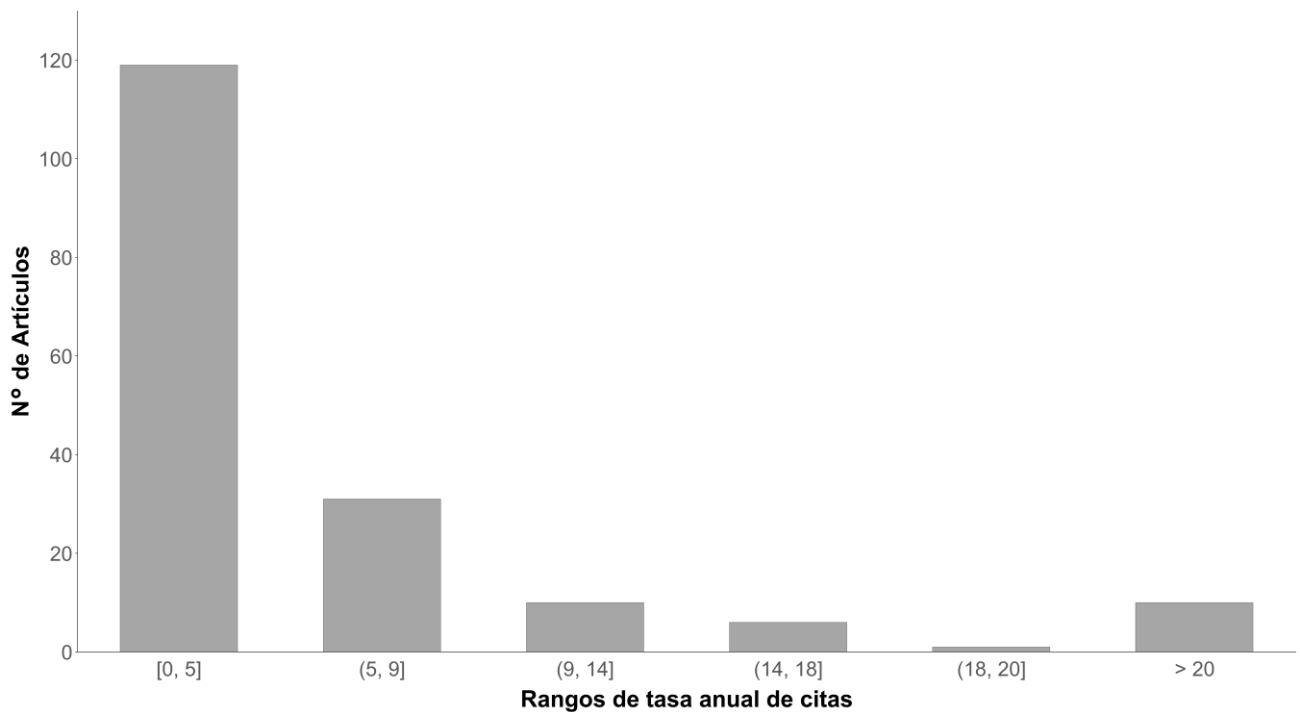


Figura 2. Artículos publicados sobre estudios forestales que utilizaron VANT agrupados por intervalos de tasa anual de citas.



Cuadro 1. Principales artículos sobre estudios forestales que utilizaron VANT con mayor tasa anual de citas en el periodo 2012-2019.

Referencia	Título del artículo	Revista	CT	CA
Nevalainen <i>et al.</i> (2018)	<i>Individual Tree Detection and Classification with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging</i>	<i>Remote Sensing</i>	86	43
Wallace <i>et al.</i> (2016)	<i>Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds</i>	<i>Forests</i>	170	43
Wallace <i>et al.</i> (2012)	<i>Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory</i>	<i>Remote Sensing</i>	272	34
Dandois y Ellis (2013)	<i>High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision</i>	<i>Remote Sensing of Environment</i>	227	32
Feng <i>et al.</i> (2015)	<i>UAV Remote Sensing for Urban Vegetation Mapping Using Random Forest and Texture Analysis</i>	<i>Remote Sensing</i>	130	26
Puliti <i>et al.</i> (2015)	<i>Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System</i>	<i>Remote Sensing</i>	123	25
Näsi <i>et al.</i> (2015)	<i>Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level</i>	<i>Remote Sensing</i>	117	23
Cunliffe <i>et al.</i> (2016)	<i>Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry</i>	<i>Remote Sensing of Environment</i>	92	23
Lisein <i>et al.</i> (2013)	<i>A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery</i>	<i>Forests</i>	153	22
Dandois <i>et al.</i> (2015)	<i>Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure</i>	<i>Remote Sensing</i>	103	21

CT = Citas totales; CA = Citas por año.

La alta tasa de citas de los artículos parece relacionarse con el creciente interés de la comunidad científica por los VANT. Al respecto, los artículos más citados refieren los procedimientos más vanguardistas y los principios básicos de entendimiento de estas tecnologías; por ejemplo, la técnica fotogramétrica a partir del movimiento (*Structure from Motion* - SfM, por sus siglas en inglés) posibilita conocer la estadística descriptiva de cada *pixel* y relacionarlo con variables de densidad forestal (Wallace *et al.*, 2016; Nevalainen *et al.*, 2018).



Análisis de coautoría y redes de colaboración científica

Los autores más notables en productividad científica sobre la utilización de los VANT en el sector forestal fueron: E. Honkavaara, con 10 publicaciones; T. Hakala, con siete; y R. Näsi, con seis. Su tasa de productividad se asoció a los ecosistemas de su área de influencia y a las instituciones de su adscripción. Notablemente, todos ellos provienen de instituciones reconocidas a nivel mundial, localizadas en Finlandia (e.g. *Finnish Geospatial Research Institute, Finnish Geospatial Research Institute y National Land Survey of Finland*).

El mapeo bibliométrico de las redes de colaboración científica confirmó el peso relativo de sus contribuciones en el ámbito de estudio. La red de coautoría se conformó por cinco *clusters* o grupos (colores) en los cuales el tamaño de los nodos representa la cantidad de artículos y el grosor de las líneas, la intensidad de la colaboración en términos de número de manuscritos (Figura 3).

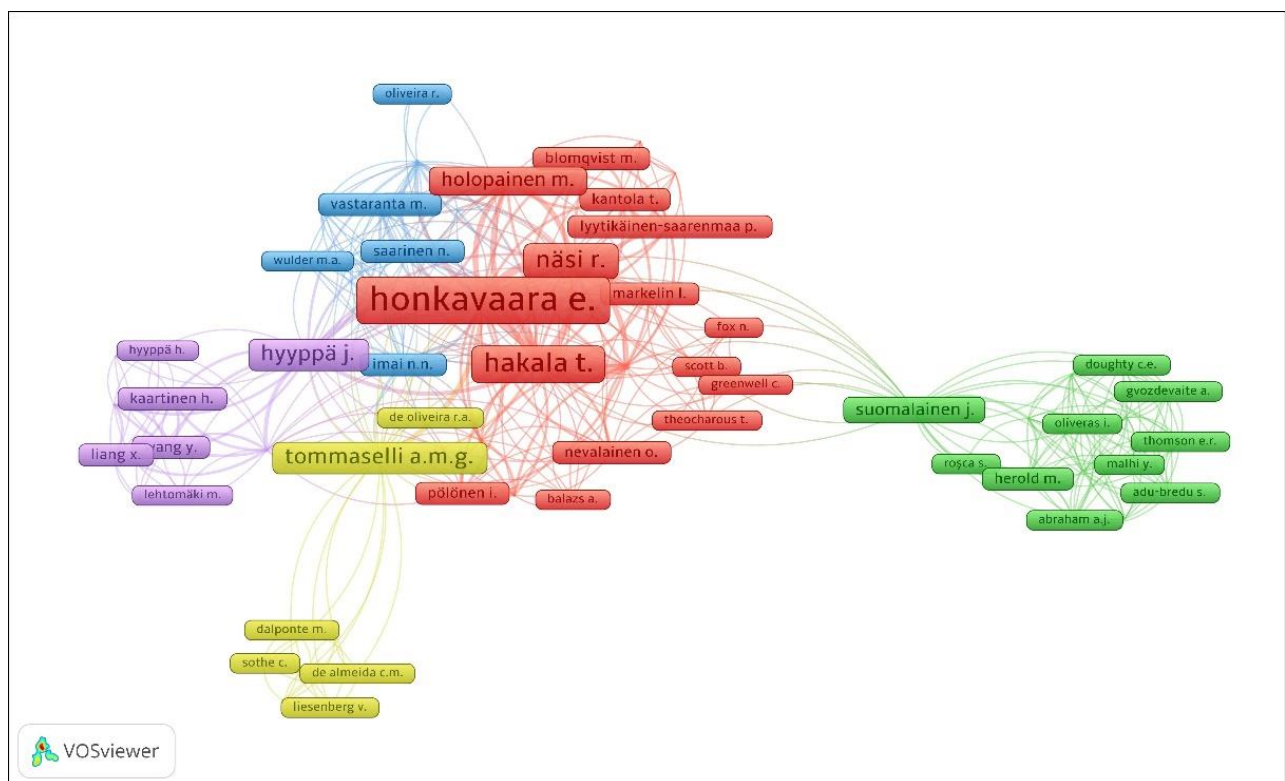


Figura 3. Clusters y redes de colaboración científica en artículos publicados sobre estudios forestales que utilizaron VANT.

Los autores: E. Honkavaara (73 enlaces y 10 artículos), T. Hakala (66 enlaces y siete artículos) y J. Näsi (56 enlaces y seis artículos) constituyeron los investigadores con mayor número de redes de colaboración científica, con lo que se confirma su alta tasa de productividad (Figura 3). Esta representación evidencia un núcleo de autores centrales densamente conectado con otros miembros menos importantes, en términos de publicaciones compartidas. Su liderazgo científico también se puede atribuir a las capacidades de investigación que brindan las instituciones en las que colaboran.

Artículos publicados por país del autor por correspondencia

En la publicación de los artículos participaron autores de 34 países, de los cuales China y Estados Unidos de América reúnen el mayor número de publicaciones: 26 y 21 artículos, respectivamente. También, destacan Finlandia, Alemania, Reino Unido y Canadá, que en conjunto con China y Estados Unidos de América representan 57 % de todos los artículos analizados en el presente estudio (Figura 4).

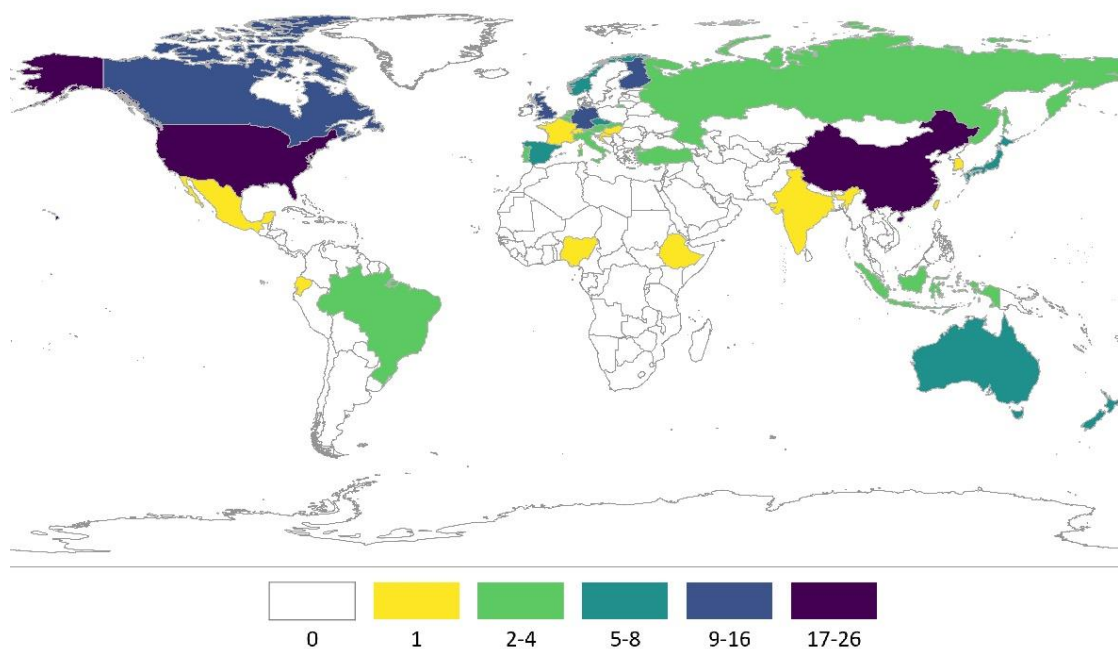
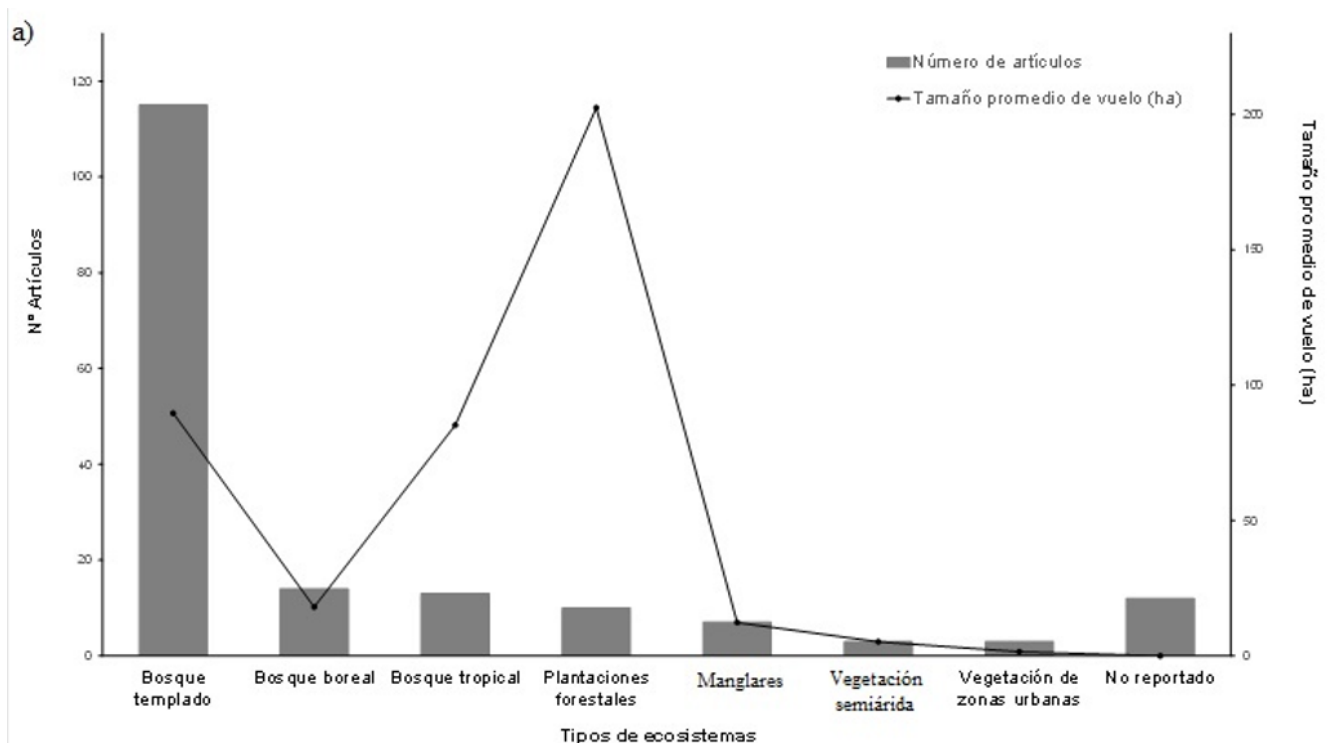


Figura 4. Número de artículos publicados sobre estudios forestales que utilizaron VANT por país del autor de correspondencia en el periodo 2012-2020.

De acuerdo con datos de la OECD (2019), los primeros dos países (China y Estados Unidos de América) hacen la inversión más alta en investigación y desarrollo. Alemania, Reino Unido y Canadá ocupan el 4º, 7º y 11º lugar, respectivamente; lo que explica su posición a la vanguardia de nuevas tecnologías en esta área del conocimiento. Por su parte, Finlandia se caracteriza por ser un país con vocación forestal (Kotilainen y Rytteri, 2011); por ello es comprensible que se ubique entre los países con más artículos publicados en el ámbito forestal que usa estas nuevas tecnologías.

Artículos publicados por tipo de ecosistema y campo de aplicación

El tipo de ecosistema forestal más sobrevolado fue el de bosques templados, con 115 artículos que representan 65 % del total de estudios analizados. Los bosques boreales fueron referidos en 14 artículos y los bosques tropicales en 13 (Figura 5a).



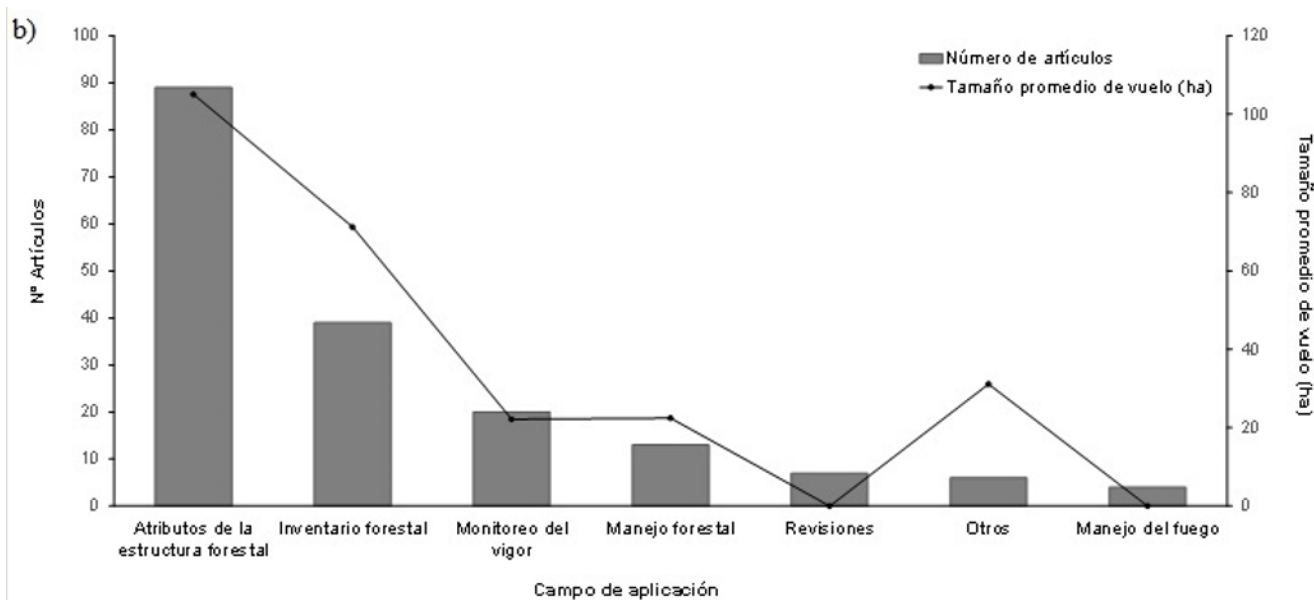


Figura 5. Número de artículos publicados sobre estudios forestales que utilizaron VANT y tamaño promedio de vuelo (a) por tipo de ecosistemas y (b) por campo de aplicación.

Cabe mencionar que no se encontraron estudios cuyo objetivo fuera determinar el tipo de ecosistema forestal sobrevolado con VANT. Salamí *et al.* (2014) estudiaron 40 artículos dedicados a monitorear áreas con vegetación, sin embargo solo distinguieron áreas agrícolas y silvestres.

El tamaño del área de vuelo promedio en los artículos analizados fue de 59.2 ha. Los bosques con mayor cobertura de vuelo promedio fueron las plantaciones forestales, con 202.4 ha; mientras que, en los bosques templados cubrieron en promedio 89.6 ha (Figura 5a).

El hecho de que en las plantaciones forestales se efectúen vuelos de mayor dimensión puede deberse a que existe interés de los técnicos y productores por llevar a cabo, en periodos cortos, monitoreos a nivel de árbol individual, así como de parámetros con importancia silvícola: número de árboles, tamaño de copa, estimación de volumen y análisis de viabilidad (Vásquez-García *et al.*, 2016). En ese sentido, los VANT aportan nuevas posibilidades para su estimación con mayor exactitud y menor tiempo en la obtención de datos (Chianucci *et al.*, 2016); lo que ha contribuido al desarrollo de un nuevo método para determinar con precisión las

características de los bosques y los tratamientos a nivel de rodales, subrodales o árboles individuales: la silvicultura de precisión (Holopainen *et al.*, 2014).

Los bosques templados ofrecen ventajas para ser sobrevolados y estudiados con los VANT debido a la existencia de bajas densidades de vegetación y mayores contrastes entre estaciones a lo largo del año. Por ello, estos ecosistemas se consideran sitios ideales, porque facilitan el vínculo de modelos y relaciones alométricas con información espectral derivada de los diferentes sensores remotos (Kachamba *et al.*, 2017; Ota *et al.*, 2017). Dicho planteamiento es congruente con los resultados que se muestran en la Figura 4, en la cual se ilustra que la mayoría de los estudios publicados corresponden a países con este tipo de vegetación.

Por su parte, 50 % de los estudios analizados se enfocan en los atributos de la estructura forestal, con mayor aplicación a nivel de árbol individual (89 artículos). Los inventarios de masas forestales y el monitoreo de su salud involucran 39 y 20 artículos, respectivamente (Figura 5b).

En este contexto, Iglhaut *et al.* (2019) refieren una tendencia similar, ya que los inventarios de árboles individuales y el monitoreo de la salud del bosque fueron los más frecuentes.

El actual interés por realizar estudios exploratorios sobre el uso de los VANT para calcular atributos estructurales de los bosques responde, sin duda, a la curva de aprendizaje de las nuevas tecnologías y la necesidad de generar propuestas sobre la utilidad de tales dispositivos. En los siguientes años, es probable, que se incrementen los estudios sobre aplicaciones específicas como el manejo forestal, control de plagas, monitoreo posincendio, entre otras.

En México, existe alta preocupación sobre los incendios forestales (Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017), por lo que es recomendable explorar el uso de los VANT para acciones de prevención, manejo y monitoreo de los efectos de los distintos regímenes de fuego (Ghamry *et al.*, 2016; McKenna *et al.*, 2017).



Tipo de sensor, altura de vuelo y resolución alcanzada

Una de las principales ventajas de los VANT respecto a las imágenes satelitales es la resolución espacial o distancia de muestreo del terreno (*Ground Sample Distance*, GSD por sus siglas en inglés) (Saadatseresht *et al.*, 2015). El GSD depende del ancho del sensor de la cámara, la distancia focal y la altura de vuelo del VANT (He *et al.*, 2012).

En el presente estudio, el GSD citado en la literatura varió de 0.4 cm a 25 cm para alturas de vuelo entre 6 m y 325 m. Sin embargo, la mayoría de los vuelos se realizaron entre 75 y 122 m de altura sobre el suelo (Figura 6). La relación esperada entre la altura de vuelo y el GSD no es lineal, debido a que se revisaron investigaciones que incluyeron cámaras termales, multiespectrales e hiperespectrales.

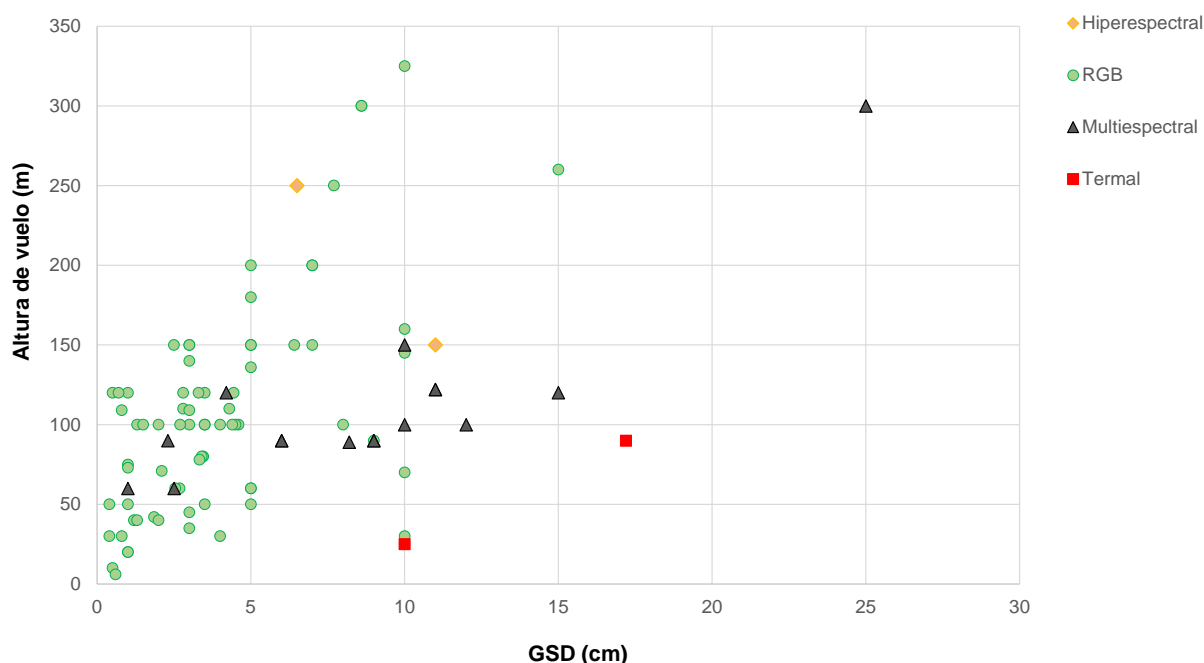


Figura 6. Relación altura de vuelo (m) y distancia de muestreo de terreno GSD (cm) registrados en los estudios analizados, clasificados por tipo de sensor.



Tipo de VANT, modelos y *software* fotogramétrico más utilizados

Por el tipo de ala, el VANT más utilizado fue el multirrotor, con 117 artículos. Los de ala fija estuvieron presentes en 36 estudios, y los monorrotor en seis (Figura 7a). Tahar y Ahmad (2013) realizaron una comparación entre VANT de tipo ala fija y multirrotor y concluyeron que los VANT de ala fija permiten mayor cobertura y autonomía de vuelo, pero son más costosos que los VANT multirrotor; lo anterior puede explicar la predominancia de los últimos en los artículos revisados.

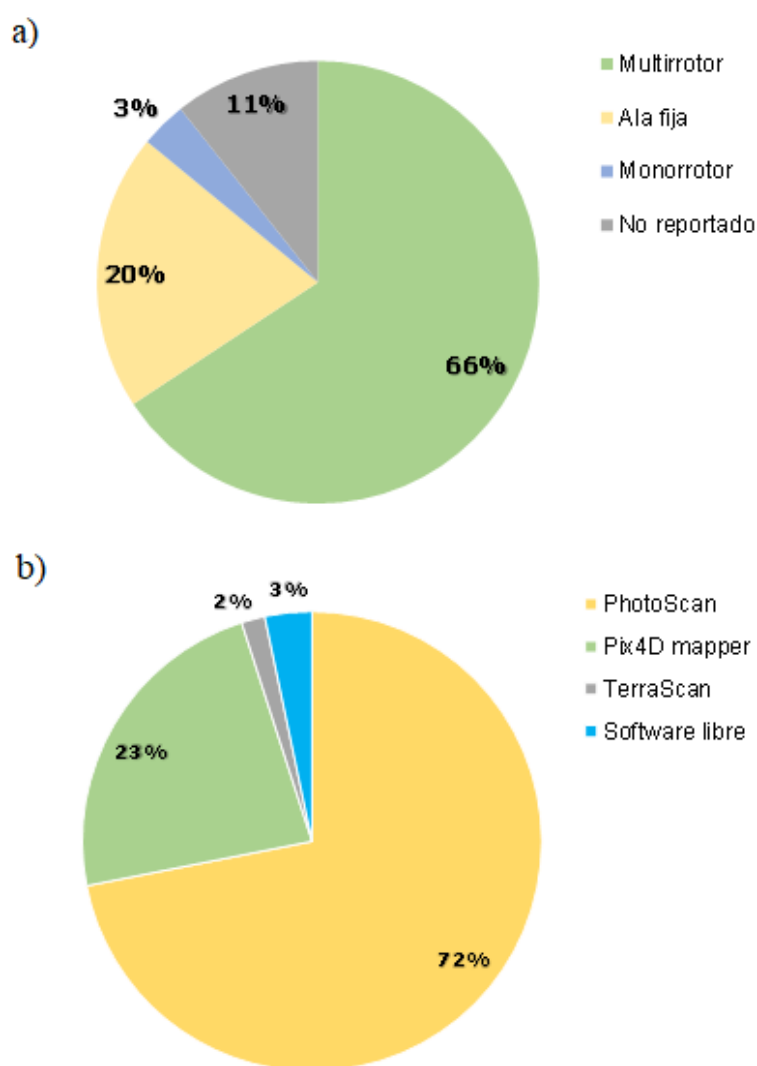


Figura 7. Estudios forestales que utilizaron VANT (a) número de artículos por tipo de ala y (b) porcentaje de estudios por *software* fotogramétrico utilizado.

En cuanto al origen de fabricación, los VANT ensamblados se usaron en 19 de los estudios, seguidos de los VANT comerciales *eBee* y *Phantom 4 Pro* con 13 y 10 artículos, respectivamente (Cuadro 2). Lo anterior, porque las marcas con mayor representación en el mercado ofrecen servicios y soporte para los distintos procesos dentro del flujo de trabajo (planeación del vuelo, ejecución y procesamiento de información). En contraste, los VANT ensamblados requieren que de manera paralela se desarrollen programas y herramientas para su manufactura (Shaqura y Shamma, 2017).

Cuadro 2. Los 10 modelos de VANT más utilizados en los estudios forestales analizados en el periodo 2012-2019.

Modelo de VANT	Número de artículos
<i>Ensamblado UAV platform</i>	19
<i>eBee</i>	13
<i>DJI Phantom 4 Pro</i>	10
<i>DJI Phantom 4</i>	7
<i>Tarot 960</i>	7
<i>DJI Matrice 600 Pro</i>	6
<i>Mikrokopter</i>	6
<i>DJI Phantom 3 Pro</i>	5
<i>DJI Phantom 2</i>	4
<i>DJI Phantom 3</i>	4

El *software* para fotogrametría con VANT *PhotoScan* dominó ampliamente la preferencia de los investigadores, estuvo presente en 72 % de los casos, seguido de *Pix4D mapper* en 23 %. El grupo de *software* libre y de código abierto solo se registró en 3 % de los estudios, grupo que incluye a *MicMac*, *OpenCV libraries*, *OpenDroneMap* y *UAV-HiRAP* (Figura 7b).

En cuanto a la calidad de productos fotogramétricos que generan los *softwares*, algunos trabajos registran que no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos con *PhotoScan* y *Pix4D mapper* (Georgopoulos *et al.*, 2016; Alidoost y Arefi, 2017; Burns

y Delparte, 2017). No obstante, Sona *et al.* (2014) concluyeron que con *PhotoScan* se lograron resultados más confiables y mejores productos en áreas planas y en presencia de sombras, en comparación con otros productos.

Es probable que los investigadores prefieran *PhotoScan* y *Pix4D mapper* porque ofrecen una interface y flujo de trabajo más amigable para el usuario. Sin embargo, existen pocas opciones de personalizar los procesamientos (Niederheiser *et al.*, 2016).

Moutinho (2015) comparó *software* fotogramétrico de propietario contra *software* libre. Entre sus hallazgos resultó que el segundo, *MicMac*, posee algunas características superiores (excelente precisión planimétrica y personalización de procesos propios), aunque su principal desventaja fue tiempo de procesamiento.

Conclusiones

Las características inherentes de los VANT ofrecen un alto potencial que los convierte en herramientas estratégicas con futuro promisorio para la gestión forestal. El desarrollo de la tecnología en el sector forestal tiene larga historia; sin embargo, con la aparición de los VANT ha experimentado un vertiginoso desarrollo, en particular durante los últimos cinco años. La creación de redes de colaboración de autorías, lideradas por científicos finlandeses ha resultado estratégica para potenciar su desarrollo. La divulgación del conocimiento se realiza a través de revistas especializadas de rápida difusión y alto factor de impacto, principalmente en temas relacionados con la estructura forestal. Se vislumbran áreas de oportunidad para su aplicación en manejo, silvicultura de precisión y protección. Por su biogeografía, México es idóneo para desarrollar conocimiento en este ámbito, aunque es apremiante fortalecer la formación de recursos humanos en dichas tecnologías.



Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el financiamiento otorgado al primer autor para la realización de sus estudios de maestría, así como al programa de MGARFA de la FCFC; se reconoce el apoyo del proyecto CONACYT A1-S-21471 y a DendroRed (<https://dendrored.ujed.mx>).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

José Luis Gallardo-Salazar: conceptualización, realización formal del análisis y redacción de documento; Marín Pompa-García: planeación, conceptualización, diseño metodológico, redacción y revisión del manuscrito durante el proceso editorial; Carlos Arturo Aguirre-Salado: colaboración en la redacción, metodología y análisis; Pablito Marcelo López-Serrano: supervisión en la metodología y en la redacción del documento; Arnulfo Meléndez-Soto: revisión y apoyo en la redacción del documento.

Referencias

- Ackerly, D. D., S. R. Loarie, W. K. Cornwell, S. B. Weiss, H. Hamilton, R. Branciforte and N. J. B. Kraft. 2010. The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions* 16(3): 476-487. Doi:10.1111/j.1472-4642.2010.00654.x.
- Alidoost, F. and H. Arefi. 2017. Comparison of UAS-based photogrammetry software for 3D point cloud generation: a survey over a historical site. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 4-4/W4: 55-61. Doi:10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017.

- AlRyalat, S. A., L. W. Malwaki and S. M. Momani. 2019. Comparing Bibliometric Analysis Using PubMed, Scopus, and Web of Science Databases. *Journal of Visualized Experiments* 152:e58494. Doi:10.3791/58494.
- Babst, F., P. Bodesheim, N. Charney, A. D. Friend, M. P. Girardin, S. Klesse, D. J. P. Moore, K. Seftigen, J. Björklund, O. Bouriaud, A. Dawson, R. J. DeRose, M. C. Dietze, A. H. Eckes, B. Enquist, D. C. Frank, M. D. Mahecha, B. Poulter, S. Record, V. Trouet, R. H. Turton, Z. Zhang and M. E. K. Evans. 2018. When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro- and prospective insight. *Quaternary Science Reviews* 197: 1-20. Doi:10.1016/j.quascirev.2018.07.009.
- Beloev, I. H. 2016. A Review on Current and Emerging Application Possibilities for Unmanned Aerial Vehicles. *Acta Technologica Agriculturae* 19(3): 70-76. Doi: 10.1515/ata-2016-0015.
- Burns, J. H. R. and D. Delparte. 2017. Comparison of commercial structure-from-motion photogrammetry software used for underwater three-dimensional modeling of coral reef environments. *SPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42-2/W3: 127-131. Doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-127-2017.
- Chianucci, F., L. Disperati, D. Guzzi, D. Bianchini, V. Nardino, C. Lastri, A. Rindinella and P. Corona. 2016. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 47: 60-68 Doi:10.1016/j.jag.2015.12.005.
- Colomina, I. and P. Molina. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92: 79-97. Doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- Cunliffe, A. M., R. E. Brazier and K. Anderson. 2016. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing of Environment* 183: 129-143. Doi: 10.1016/j.rse.2016.05.019.

- Dandois, J. P. and E. C. Ellis. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment* 136: 259-276. Doi: 10.1016/j.rse.2013.04.005.
- Dandois, J. P., M. Olano and C. E. Ellis. 2015. Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. *Remote Sensing* 7(10):13895-13920. Doi:10.3390/rs71013895.
- Feng, Q., J. Liu and J. Gong. 2015. UAV Remote Sensing for Urban Vegetation Mapping Using Random Forest and Texture Analysis. *Remote Sensing* 7(1): 1074-1094. Doi:10.3390/rs70101074.
- Gambella, F., L. Sistu, D. Piccirilli, S. Corposanto, M. Caria, E. Arcangeletti, A. R. Proto, G. Chessa and A. Pazzona. 2016. Forest and UAV: a bibliometric review. *Contemporary Engineering Sciences* 9: 1359-1370
Doi:10.12988/ces.2016.68130.
- García-Valdés, R., A. Estrada, R. Early, V. Lehsten and X. Morin. 2020. Climate change impacts on long-term forest productivity might be driven by species turnover rather than by changes in tree growth. *Global Ecology and Biogeography* 00:1-13. Doi:10.1111/geb.13112.
- Georgopoulos, A., C. Oikonomou, E. Adamopoulos and E. K. Stathopoulou. 2016. Evaluating unmanned aerial platforms for cultural heritage large scale mapping. *International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 41-B5: 355-362. Doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-355-2016.
- Ghamry, K. A., M. A. Kamel and Y. Zhang. 2016. Cooperative forest monitoring and fire detection using a team of UAVs-UGVs. *In: International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. June 7-10. Arlington, VA, USA. pp. 1206-1211 Doi:10.1109/ICUAS.2016.7502585.

- Granda-Orive, J. I., A. Alonso-Arroyo, F. García-Río, S. Solano-Reina, C. A. Jiménez-Ruizand y R. Aleixandre-Benavent. 2013. Ciertas ventajas de Scopus sobre Web of Science en un análisis bibliométrico sobre tabaquismo. *Revista española de Documentación Científica* 36(2):e011. Doi:10.3989/redc.2013.2.941.
- Gustafson, E. J. and B. R. Sturtevant. 2013. Modeling Forest Mortality Caused by Drought Stress: Implications for Climate Change. *Ecosystems* 16(1): 60-74 Doi:10.1007/s10021-012-9596-1.
- He, J., Y. Li and K. Zhang. 2012. Research of UAV Flight Planning Parameters. *Positioning* 3(4): 43-45. Doi:10.4236/pos.2012.34006.
- Holopainen, M., M. Vastaranta and J. Hyyppä. 2014. Outlook for the Next Generation's Precision Forestry in Finland. *Forests* 5(7):1682-1694. Doi:10.3390/f5071682.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). 2011. ICAO Circular 328. Unmanned Aircraft Systems (UAS). Technical Report. International Civil Aviation Authority. Montreal, Canada. https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf (10 de junio de 2020).
- Iglhaut, J., C. Cabo, S. Puliti, L. Piermattei, J. O'Connor and J. Rosette. 2019. Structure from Motion Photogrammetry in forestry: a review. *Current Forestry Reports* 5(3): 155-168. Doi:10.1007/s40725-019-00094-3.
- Kachamba, J. D., O. H. Ørka, E. Næsset, T. Eid and T. Gobakken. 2017. Influence of Plot Size on Efficiency of Biomass Estimates in Inventories of Dry Tropical Forests Assisted by Photogrammetric Data from an Unmanned Aircraft System. *Remote Sensing* 9(6):610. Doi:10.3390/rs9060610.
- Kotilainen, J. and T. Rytteri. 2011. Transformation of forest policy regimes in Finland since the 19th century. *Journal of Historical Geography* 37(4): 429-439. Doi: 10.1016/j.jhg.2011.04.003.

Lisein, J., M. Pierrot-Deseilligny, S. Bonnet and P. Lejeune. 2013. A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests* 4(4):922-944.
Doi:10.3390/f4040922.

Markets and Markets.2019. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market (2019-2025). <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/unmanned-aerial-vehicles-uav-market-662.html> (9 de noviembre de 2019).

Martínez-Santiago, S., A. Alvarado-Segura, F. J. Zamudio-Sánchez and D. Cristóbal-Acevedo. 2017. Spatio-temporal analysis of forest modeling in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23: 5-22.
Doi:10.5154/r.rchscfa.2016.01.003.

McKenna, P., P. D. Erskine, A. M. Lechner and S. Phinn. 2017. Measuring fire severity using UAV imagery in semi-arid central Queensland, Australia. *International Journal of Remote Sensing* 38(14): 4244-4264
Doi:10.1080/01431161.2017.1317942.

Moutinho, O. F. G. 2015. Evaluation of photogrammetric solutions for rpas: commercial vs. open source. Master's Thesis. University of Porto. Porto, Portugal. 121 p.

Näsi, R., E. Honkavaara, P. Lyytikäinen-Saarenmaa, M. Blomqvist, P. Litkey, T. Hakala, N. Viljanen, T. Kantola, T. Tanhuanpää and M. Holopainen. 2015. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sensing* 7(11):15467-15493.
Doi:10.3390/rs71115467.

Nevalainen, O., E. Honkavaara, S. Tuominen, N. Viljanen, T. Hakala, X. Yu, J. Hyyppä, H. Saari, I. Pölönen, N. N. Imai and M. G. A. Tommaselli. 2018. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. *Remote Sensing* 9(3):185.
Doi:10.3390/rs9030185.

- Niederheiser, R., M. Mokroš, J. Lange, H. Petschko, G. Prasicek and S. O. Elberink. 2016. Deriving 3D point clouds from terrestrial photographs - comparison of different sensors and software. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41-B5: 685-692. Doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-685-2016.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2019. Gross domestic spending on R&D (indicator). <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm#indicator-chart> (10 de noviembre de 2019).
- Ota, T., M. Ogawa, N. Mizoue, K. Fukumoto and S. Yoshida. 2017. Forest structure estimation from a UAV-based photogrammetric point cloud in managed temperate coniferous forests. *Forests* 8(9):343. Doi:10.3390/f8090343.
- Piao, S., Q. Liu, A. Chen, I. A. Janssens, Y. Fu, J. Dai, L. Liu, X. Lian, M. Shen and X. Zhu. 2019. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology* 25(6): 1922-1940. Doi:10.1111/gcb.14619.
- Puliti, S., O. H. Ørka, T. Gobakken and E. Næsset. 2015. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing* 7(8):9632-9654. Doi:10.3390/rs70809632.
- Saadatseresht, M., A. H. Hashempour and M. Hasanlou. 2015. UAV photogrammetry: a practical solution for challenging mapping projects. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40-1/W5: 619-623. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-619-2015.
- Salamí, E., C. Barrado and E. Pastor. 2014. UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sensing* 6(11):11051-11081. Doi:10.3390/rs61111051.

- Shaqura, M. and J. Shamma. 2017. An Automated quadcopter cad based design and modeling platform using solidworks api and smart dynamic assembly. *In: 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. July 26-28. Madrid, Spain. pp. 122-131 Doi:10.5220/0006438601220131.
- Sona, G., L. Pinto, D. Pagliari, D. Passoni and R. Gini. 2014. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth Science Informatics* 7(2): 97-107. Doi:10.1007/s12145-013-0142-2.
- Tahar, K. and A. Ahmad. 2013. An Evaluation on fixed wing and multi-rotor uav images using photogrammetric image processing. *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index* 73. *International Journal of Computer and Information Engineering* 7(1): 48-52 Doi:10.5281/zenodo.1078074.
- Van, N. J. and L. Waltman. 2019. VOSviewer manual, Leiden: Univeristeit Leiden. Leiden, The Netherlands. 53 p.
- Vásquez-García, I., V. M. Cetina-Alcalá, R. Campos-Bolaños y L. F. Casal-Ángeles. 2016. Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la mixteca alta oaxaqueña. *Agroproductividad* 9(2):12-19. <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/716/585>. (10 de junio de 2020).
- Vicente-Serrano, S. M., J. J. Camarero, J. M. Olano, N. Martín-Hernández, M. Peña-Gallardo, M. Tomás-Burguera, A. Gazol, C. Azorin-Molina, U. Bhuyan and A. El Kenawy. 2016. Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment* 187: 14-29. Doi:10.1016/j.rse.2016.10.001.
- Wallace, L., A. Lucieer, C. Watson and D. Turner. 2012. Development of a UAV-LiDAR System with application to forest inventory. *Remote Sensing* 4(6):1519-1543. Doi:10.3390/rs4061519.

Wallace, L., A. Lucieer, Z. Malenovský, D. Turner and P. Vopěnka. 2016. Assessment of forest structure using two uav techniques: a comparison of airborne laser scanning and structure from motion (sfm) point clouds. *Forests* 7(3):62. Doi:10.3390/f7030062.

Yao, H., R. Qin and X. Chen. 2019. Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications—A Review. *Remote Sensing* 11(12):1443. Doi:10.3390/rs11121443.

Zúñiga-Vásquez, J. M., D. Cisneros-González, M. Pompa-García, D. A. Rodríguez-Trejo and G. Pérez-Verdín. 2017. Spatial modeling of forest fires in Mexico: an integration of two data sources. *Bosque (Valdivia)* 38: 563-574.

Doi:10.4067/S0717-92002017000300014.



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 \(CC BY-NC 4.0 Internacional\)](#)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.