

# Experiencia educativa de drones en silvicultura 4.0, competencias específicas del profesional forestal

Educational experience of drones in forestry 4.0, specific competences of the forestry professional

**Carlos Medina Tello**

Tecnológico Nacional de México, Campus Zitácuaro, Zitácuaro, Mich.

**Pablito Marcelo López Serrano**

Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez de Durango, Durango, Dgo.

**Víctor Rocha Ramírez**

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Morelia, Mich.

**Andrés Torres Miranda**

Escuela de estudios Superiores Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Morelia, Mich.

**María Dolores Uribe Salas\***

Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tarímbaro, Mich.

\*Autor para correspondencia: maria.uribe@umich.mx

## Resumen

La tecnología avanza progresivamente a mayor velocidad, impulsando el desarrollo prácticamente en todas las áreas del conocimiento humano. En el ámbito forestal, la tecnología ha venido a aligerar y eficientizar el trabajo en campo. El uso de vehículos aéreos no tripulados, están impactando favorablemente en estudios de estructura de comunidades vegetales, desarrollo de inventarios y ordenamiento forestal, entre otros aspectos. Es necesario integrar las tecnologías para la información y análisis de datos masivos, enfocados en sistemas forestales para hacer propuestas de aprovechamiento, conservación y recuperación de superficies maderables. En nuestro país, ya están siendo utilizadas estas tecnologías, es necesario formar profesionistas que tengan todas las capacidades para manejarlas. Por lo anterior, se propone integrar esos conocimientos en una materia de la currícula de los planes de estudio del nivel medio superior y superior. La propuesta se aborda desde un punto de vista práctico, con la utilización de uno de los drones más accesibles en el mercado. El Mavic 2 Pro DJL cumple con lo mínimo necesario para iniciar la toma de datos, indispensables para la Silvicultura 4.0. La experiencia planteada podrá ser de utilidad para estudiantes y profesionales.

**Palabras clave:** Bosques; dron; Mavic 2 Pro DJL; Silvicultura 4.0; Competencias del Profesorado

## Abstract

Technology advances progressively at a faster speed, promoting development in practically all areas of human knowledge. In the forestry field, technology has come to lighten and make field work more efficient. The use of unmanned aerial vehicles is having a favorable impact on the studies in the structure of plant communities, inventory development and forest management, among other aspects. It is necessary to integrate technologies for information and analysis of massive data, focused on forest systems to make proposals for the use, conservation and recovery of timber areas. In our country, these technologies are already being used, it is necessary to train professionals who have all the skills to handle them. Therefore, it is proposed to integrate this knowledge in a subject of the curriculum of the study plans of the secondary and higher levels of education. The proposal is approached from a practical point of view, with the use of one of the most accessible drones on the market. The Mavic 2 Pro DJL meets the minimum necessary to start data collection, essential for Forestry 4.0. The experience raised may be useful for students and professionals.

**Keywords:** Forests; drone; Mavic 2 Pro DJL; Forestry 4.0; Teacher's Competencies

## Introducción

En la última década, la sociedad y la economía han experimentado cambios significativos asociados a la masiva digitalización de la información, así como, al progreso tecnológico asociado al desarrollo de hardware y software especializado y eficiente (Brettel *et al.*, 2014). Lo anterior explica el origen del término Industria 4.0, concepto que invariablemente remite a la propuesta de una cuarta revolución industrial (Rojco, 2017) que integra los procesos reales con los procesos de cómputo virtual mediante algoritmos (Feng y Audy, 2020). Actualmente, el término 4.0 se aplica a la generación, almacenamiento, intercambio y procesamiento de datos en forma masiva (Müller *et al.*, 2019), por lo que es fundamental el conocimiento de conceptos innovadores que incluyen el internet de las cosas, *Big Data*, el cómputo en la nube, robots automatizados, simulación virtual, realidad aumentada, impresión en 3D, procesos de integración en internet y sistemas ciber físicos (Aceto *et al.*, 2019). La aplicación de estos avances, han impulsado el desarrollo de nuevas estrategias para el manejo y cultivo de los bosques, constituyendo el campo de acción de la Silvicultura 4.0, donde al igual que en otras áreas, han llegado para quedarse (Feng y Audy, 2020; Pinno *et al.*, 2021; Sahal *et al.*, 2021). La Silvicultura 4.0 es una subdisciplina que integra la tecnología digital a las prácticas silvícolas con el objetivo de que las investigaciones aumenten su nivel de detalle y la magnitud de la superficie estudiada, reduce los costos de inventarios desde los tiempos de muestreo y trabajo en campo, minimiza el error al tomar datos, favorece mejores prácticas de manejo, analiza la adaptación al cambio climático, evita accidentes durante el combate a los incendios forestales, entre otras ventajas (Singh *et al.*, 2021). El uso de plataformas y aplicaciones móviles, eficientiza la generación de información orientada a mejorar los planes de manejo a través de conectividad en tiempo real, desarrollando las prácticas de uso con mayor certidumbre, para asegurar la disponibilidad de madera certificada, al mejorar la conservación de los bosques (Duinker, 2001). Los datos obtenidos de los rodales y sitios se analizan y evalúan en tiempo real, para ser utilizados dentro del plan de

manejo forestal más adecuado, adaptado a nuestras necesidades actuales y priorizando una relación sostenible con los ambientes naturales.

Los ecosistemas forestales proporcionan servicios ambientales que favorecen a la vida en el planeta, los cuales pueden ser evaluados mediante técnicas desarrolladas a partir de la Silvicultura 4.0; procesos como la captura del dióxido de carbono y la liberación de oxígeno durante el desarrollo de la fotosíntesis, puede ser medido en tiempo real gracias a la tecnología móvil, la recarga de los mantos acuíferos a través de la filtración del agua de lluvia al subsuelo, el reciclaje de nutrientes, el mantenimiento del microclima, la formación y mantenimiento del suelo, pueden ser incorporados a bases de datos en tiempo real y distribuidos en medios virtuales, para su análisis posterior.

Las tecnologías innovadoras y disruptivas asociadas a la Industria 4.0, también generan cambios en el ámbito educativo como la Educación 4.0, en la que el aprendizaje digital a partir del análisis de datos es un componente fundamental (Flores-Alanís *et al.*, 2016). Las universidades han incorporado asignaturas y planes de estudio relacionados al concepto tecnológico 4.0, principalmente en los países con mayor desarrollo. En México, se han desarrollado licenciaturas que responden a las exigencias de la Industria 4.0, como Ciencia de Datos, Inteligencia Artificial y Tecnologías para la Información. Sin embargo, en diferentes planes académicos, se han incorporado asignaturas optativas o complementarias a la currícula de diferentes licenciaturas e ingenierías.

En licenciaturas relacionadas al sector forestal, se contemplan programas de asignatura en las que se hace énfasis en tecnologías 4.0, entre las que se incluyen tópicos como sistemas de información geográfica, minería de datos y cómputo inteligente para el reconocimiento de patrones. Además, se hace énfasis en asignaturas que permiten la obtención de datos de forma masiva mediante sensores específicos integrados a dispositivos móviles como satélites y vehículos aéreos no tripulados, así como, en los medios de almacenamiento de la información mediante repositorios virtuales y la conformación de grandes bases de datos. De manera particular, en este trabajo consideramos que el desarrollo de la Silvicultura 4.0 debe ser aplicado para el

crecimiento y aprovechamiento forestal en México. Es necesario integrar las tecnologías para la información y análisis de datos masivos, para el monitoreo de sistemas forestales y hacer propuestas de aprovechamiento, conservación y recuperación de superficies forestales. El propósito de este trabajo, es hacer una propuesta desde un punto de vista práctico, considerando las experiencias educativas mediante la adopción de tecnologías de precisión, para el monitoreo y aprovechamiento, siendo el uso de drones un punto de partida, así como el ensayo de la factibilidad de implementarlos en planes y programas de estudio, considerando las áreas de oportunidad de nuestro país.

### Estado del Arte

El desarrollo tecnológico actual ha sido vertiginoso debido al uso de nuevas tecnologías digitales, infraestructura de red (internet), inteligencia cibernética y una cadena de suministros que conforman un “ecosistema digital” (Feng y Audy, 2020). Estos componentes son esenciales para la transformación de la industria forestal.

**Internet de las cosas y Big Data.** El internet de las cosas (IoT o *Internet of Things*, por sus siglas en inglés) es una aplicación tecnológica que ha servido como punto de partida para la generación y distribución masiva de datos aprovechando el espacio virtual que brinda la red. El IoT vincula todos los artículos y equipos domésticos y de uso cotidiano a internet, con el objetivo de monitorear su uso (Atzori *et al.*, 2017), enviando la información generada y almacenada en sus sensores a una ubicación central virtual, al que se denomina “nube” de información (Maté, 2014). La recopilación de datos masivos, conforman lo que se conoce como *Big Data*. La tecnología de *Big Data* es utilizada para recopilar, almacenar y analizar en tiempo real información generada en los sensores silvícolas.

La información almacenada en el *Big Data* puede ser analizada en programas informáticos de inteligencia artificial, que en tiempo real pueden determinar las actividades de manejo necesarias para mantener los bosques en condiciones óptimas, elegir el momento correcto para aprovechamiento, entre otros. En el sector forestal, las tecnologías de adquisición de datos e información incluyen el

*software* y *hardware* utilizados en el registro y almacenamiento de variables dasométricas. La información obtenida es rápidamente transmitida, almacenada, analizada y procesada con diversas herramientas tecnológicas como el internet de las cosas, el *Big Data* y la inteligencia artificial (Zou *et al.*, 2019). Las soluciones tecnológicas basadas, por ejemplo, en inteligencia artificial han permitido a los silvicultores cuantificar el volumen de madera que tienen, además de asegurar una cadena de custodia, que permita supervisar la legalidad de su procedencia.

Los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen una herramienta útil para el análisis de la información y la toma de decisiones en el sector forestal, obteniendo como productos finales, mapas en donde se superponen diversas variables dasométricas de grandes superficies forestales. Considerando los resultados obtenidos, se pueden priorizar diferentes actividades en los planes de manejo forestal.

Para monitorear los sitios, los drones utilizan diversos sensores, los más disponibles son: RGB (400-700 nm), térmico (5000-14,000 nm), infrarrojo (IR), infrarrojo cercano (NIR) (700-8500 nm), multiespectral e hiperespectral.

**Big Data y Drones en el Sector Forestal.** Los dispositivos móviles que integran las tecnologías de información, comunicación y control en el sector forestal incluyen robots, herramientas y plataformas. Los dos tipos de robots más empleados son los vehículos terrestres no tripulados y los vehículos aéreos no tripulados (Tokekar, *et al.*, 2016), siendo los drones los más importantes dentro de estos últimos.

Los drones tienen *software* para la planificación de auto-vuelo, además, disponen de aplicaciones para teléfonos inteligentes, que permiten delimitar el área de investigación. Los drones cuentan con sensores y cámaras que permiten capturar información electromagnética de las superficies, mediante imágenes con diferente resolución espacial. Con las imágenes obtenidas con los drones, se pueden generar mapas útiles para el conteo de árboles, medir su altura, así como la topografía del terreno (Birdal, 2021; Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020). Los drones también se utilizan para detectar incendios, desarrollar mapas de vigor basados en índices de

vegetación y gestión de riego (Meneses *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2019). Las cámaras de visión hiperespectral permiten la segmentación de imágenes, mapeo de malezas, estimación del estado del nitrógeno, estimación de la biomasa, estimación de la clorofila, evaluación del estado del agua y detección temprana de enfermedades de las plantas (de Castro *et al.*, 2021; Meneses *et al.*, 2015). Las cámaras de visión en el rango del infrarrojo cercano (NIR, *near infrared*), permiten la estimación de la biomasa y estructura del dosel (Lu *et al.*, 2016).

En el sector forestal, la detección realizada por sensores integrados a satélites y drones, son fundamentales para la obtención precisa de datos sobre diferentes procesos que ocurren en sistemas forestales como la actividad fotosintética, productiva primaria, estructura, estimación de biomasa (Tang y Shao, 2015). Esta información a gran escala proporciona información predictiva en las operaciones silvícolas e impulsa decisiones operativas en tiempo real. La Silvicultura 4.0 permite disponer de información de los bosques en tiempo real para tomar decisiones inmediatas, en este punto, los drones son una herramienta fundamental en esta revolución (De Clercq *et al.*, 2018).

**Silvicultura inteligente y de precisión.** La disminución de la cobertura forestal, la explotación de los recursos naturales y la degradación de los ambientes naturales, requieren de la aplicación de nuevas técnicas que posibiliten una eficiente toma de decisiones en regiones específicas. En este sentido, los drones tienen un papel relevante porque el gran volumen de información que obtiene, permite los análisis inteligentes, al mismo tiempo de identificar problemas localizados en áreas pequeñas (Gallardo-Salazar *et al.*, 2020).

La silvicultura inteligente observa, mide y analiza las cantidades masivas de datos provenientes de los sensores enlazados vía IoT, enseguida toma decisiones y da respuestas en tiempo y espacio a las variaciones internas y externas detectadas a lo largo de superficies forestales. Mediante aplicaciones específicas se ubica espacialmente al sitio, se hace una gestión sostenible de recursos y se interconecta los procesos y maquinaria necesaria (Sahal, *et al.*, 2021).

Por otro lado, la silvicultura de precisión tiene

como objetivo la obtención y visualización de datos de alta resolución para robustecer la toma de decisiones operativas en torno a sitios específicos dentro de un sistema forestal (Dash *et al.*, 2016). En este sentido, el objetivo principal consiste en realizar mediciones precisas y repetibles que se utilicen para el cultivo y cosecha de árboles, así como para conservación de la vida silvestre (Dyck, 2003). La agricultura de precisión requiere de tecnologías de percepción remota que permitan obtener datos de alta resolución.

Los métodos de escaneo láser, como los sistemas *LIDAR* (por las siglas en inglés de *light detection and ranging*) han demostrado tener aplicaciones efectivas en la silvicultura de precisión (Reutebuch *et al.*, 2005). Los sistemas *LIDAR* transmiten rápidamente pulsos de luz que se reflejan del terreno, y de otros objetos, obteniéndose imágenes de alta resolución y precisión, con fotogramas de hasta un millón de píxeles, obteniendo hasta 10 fotogramas por segundo (Céspedes y Castillo, 2008; Wei *et al.*, 2010). Los equipos *LIDAR* pueden ser operados por un dron, un vehículo terrestre o con el manejo de una persona. La tecnología *LIDAR* ofrece varias aplicaciones en el sector forestal, entre otras, realizar inventarios forestales, determinar la velocidad de crecimiento de la vegetación, determinar los índices de propagación de enfermedades, determinar propiedades estructurales del bosque y evaluar algunos parámetros de los árboles (Moskal *et al.*, 2009; Peterson *et al.*, 2007).

Los drones que cuentan con tecnología *LIDAR*, que realizan vuelos lentos de baja altura, producen una nube de alta densidad de puntos y un amplio intervalo de ángulos, lo que permite visualizar la estructura y ramificación de cada árbol de forma individual (Kellner *et al.*, 2019), que puede emplearse para el cálculo de biomasa forestal. Lo anterior ofrece la ventaja de minimizar costos y realizar estimaciones precisas en amplias superficies.

### **Perspectivas en el uso de drones: investigación y educación**

El amplio desarrollo tecnológico expuesto, permite vislumbrar la existencia de una vasta variedad de modelos de trabajo, en el sector forestal en México. La interrogante más importante que surge es ¿cómo

se puede implementar la investigación y el aprendizaje del sector forestal, atendiendo el modelo de la Silvicultura 4.0, en nuestras instituciones educativas de nivel medio-superior y superior? Reconociendo las posibilidades y el potencial de incluir asignaturas que permitan tanto a alumnos como a profesores el conocer el campo de acción de la silvicultura inteligente y de precisión, utilizando como ejemplo un dron particular, el *Mavic 2 Pro*, el cual es uno de los que más se ha venido utilizando (Gallardo-Salazar *et al.*, 2020).

**Perspectivas de investigación.** Tang y Shao (2015) realizan una revisión de los estudios que utilizaron drones, identificando aquellas aplicaciones que pueden ser relevantes en el sector forestal, las cuales se detallan a continuación:

- a) Estructura forestal. Los drones pueden proporcionar imágenes de alta resolución para identificar cubiertas y usos de suelo de forma rápida. La combinación de videos y fotografías permiten registrar actividades humanas e incluso la identificación de especies vegetales. Gallardo-Salazar *et al.* (2020) identifican que la mayor cantidad de estudios realizados con drones se ubican en este campo de aplicación.
- b) Manejo forestal y *gaps*. Los huecos que se observan en el dosel de un bosque, en muchas ocasiones son producto de la perturbación o tala de árboles, procesos que pueden ser reconocidos fácilmente con las imágenes de alta resolución que se obtienen con el uso de drones.
- c) Altura del dosel. Este es un parámetro crítico en el sector forestal, estimado tradicionalmente con métodos fotogramétricos y trabajo de campo. Actualmente, la incorporación de tecnología *LIDAR*, incorporada a los drones, se ha convertido en una herramienta que permite su estimación de manera rápida y a bajo costo.
- d) Monitoreo de incendios. El uso simultáneo de drones, de vuelo alto y medio, permiten la inspección de amplias superficies forestales, los cuales brindan información en tiempo real del desarrollo de incendios.
- e) Manejo forestal intensivo. El uso de drones puede ser muy útil para la aplicación de fertilizantes o plaguicidas en áreas específicas a lo largo de una plantación forestal, utilizando la precisión en la aspersión de químicos. Esta es una

técnica utilizada en la denominada agricultura de precisión, la cual permite tener mejores tasas de supervivencia y aprovechamiento de plantas.

**Perspectivas del equipo Mavic 2 Pro DJI.** El Mavic 2 Pro DJI (Figura 1) es un equipo que cuenta con sistemas de visión omnidireccional y detección por infrarrojos. Tiene una cámara con sensor CMOS de 1" que la habilita para grabar videos 4K y tomar fotografías de 20 megapíxeles, admite zoom óptico 2x, objetivo de 24 a 48 mm y filtros, reduce el rango de vibración angular. El control remoto ofrece una distancia máxima de control de 8 km. El *Mavic 2 Pro* alcanza una velocidad máxima de 72 km por hora y un tiempo máximo de vuelo de 31 minutos. La pantalla muestra en todo momento la información en tiempo real de la aeronave (Manual *Mavic 2 Pro DJI*).



Figura 1. Mavic 2 Pro DJI

La cámara montada en el *Mavic 2 Pro* permite tomar "ortofotos", fotografías aéreas de alta definición con propiedades de una proyección ortogonal, presentando rectificación diferencial, corrigiendo el desplazamiento de superficies verticales y eliminando las deformaciones ópticas del lente de la cámara. Se puede hacer cartografía de áreas "pequeñas", reconocimiento de rodales, identificación de bosques, determinación de etapas de crecimiento arbóreo, seguimiento de regeneración de bosques y dar seguimiento a etapas sucesionales, evaluación de incendios forestales y en general los cambios que ocurren en la vegetación (Ancira-Sánchez y Treviño, 2015). Se realizaron una serie de pruebas para constatar las capacidades del *Mavic 2 Pro* para ser utilizado en actividades forestales y educativas (Figura 2). Se realizaron cuatro prácticas de vuelo, para el manejo del *Mavic 2 Pro*, con instructores certificados del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM: Paz del

Carmen Coba Pérez y Kevin Pérez. Los vuelos de prueba incluyeron capacitación en la operación y manejo de drones con el uso de las aplicaciones *DJI GO 4* y *DJI PILOT*, todas realizadas en el Tecnológico Nacional de México Campus Zitácuaro y el Centro de Bachillerato Tecnológico Forestal No. 6 (Figura 3). Se realizaron cinco polígonos de vuelo para obtener los ortomosaicos, quedando pendiente el análisis y vuelos para identificar los sitios de muestreo (Figura 4).



Figura 2. Equipo interinstitucional durante las prácticas de vuelo (izquierda y derecha).



Figura 3. Tecnológico Nacional de México Campus Zitácuaro (izquierda) y fotografía durante el vuelo en el Centro de Bachillerato Tecnológico Forestal No. 6 (derecha).

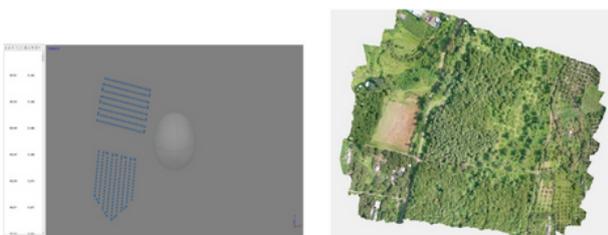


Figura 4. Trazado de los polígonos de vuelo (izquierda), ortomosaico (derecha).

El aparato a prueba es de fácil manejo, el control remoto es comprensible, rápidamente se puede tener un primer vuelo, este vuelo es mejor hacerlo a una altura superior a la altura de los principales obstáculos de alrededor para poder hacer las maniobras sin poner en riesgo a los practicantes y al propio aparato. El dron se vuela en control con las palancas derecha (movimiento arriba, abajo y derecha e izquierda) e izquierda (movimiento adelante, atrás y giro derecha e izquierda). En los primeros vuelos se recomienda poner el aparato en

modo de vuelo “P”. Con estas condiciones se pudieron hacer maniobras aplicables a muestreos de terrenos forestales; en espiral para un rodal, vuelo de abajo hacia arriba tratando de medir altura de árboles, delimitación y muestreo de cuadrantes realizando las diferentes “pasadas” (Figura 5).

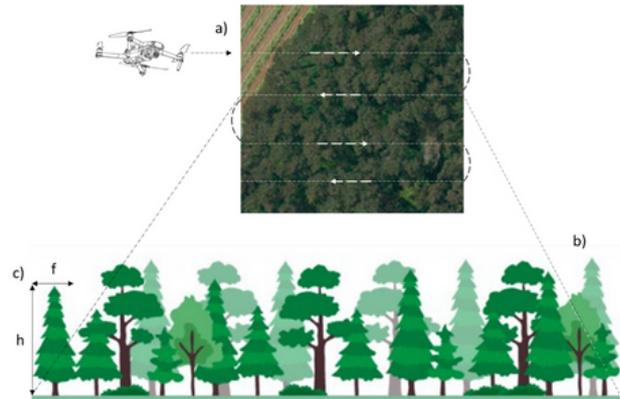


Figura 5. Representación esquemática del muestreo y de los parámetros estructurales medidos. a) ruta de vuelo; b) esquema de un transecto mostrando el perfil arbóreo; c) medidas tomadas de un árbol individual, en este caso, del borde. h: altura; f: cobertura de copa.

**Perspectivas educativas.** La práctica de vuelos y muestreos del *Mavic 2 Pro DJI* se vuelven rápidos y eficientes, de fácil maniobrabilidad y desde nuestro punto de vista ideal para introducir a los alumnos de cualquier nivel a los principios y estudios de la Silvicultura 4.0. Es de vital importancia que los alumnos tengan experiencias con las tecnologías de vanguardia. Invertir en este tipo de tecnología puede tener resultados favorables en el corto, mediano y largo plazo, no solo en docencia sino también en la investigación, ya que es factible tener resultados de alta calidad con aparatos relativamente asequibles. El desarrollo vertiginoso de la tecnología asociada a los drones, ha permitido bajar costos en los muestreos, obtener datos en tiempo real que se almacenan en la nube, aumentan la precisión, cantidad y calidad de los datos que pueden proporcionar la información necesaria, para una óptima toma de decisiones. En nuestro país es absolutamente necesario proveer a nuestros estudiantes, de herramientas de vanguardia para su desarrollo profesional. Lo anterior nos permitirá contar con especialistas en técnicas que ayudarán en el desarrollo de la Silvicultura 4.0, lo cual puede contribuir para un

manejo más eficiente de nuestros recursos naturales. La enseñanza situada considera que los alumnos se apropian de los conocimientos cuando participan directamente en actividades reales que constituirán su campo laboral (Figura 6). La enseñanza con drones permitirá a los alumnos desarrollar las siguientes actividades: la planificación del vuelo en un inventario forestal, el control fitosanitario, el manejo del fuego, cálculo de la deforestación e identificar sitios donde se efectúa tala ilegal u otros procesos de degradación.



Figura 6. Diferentes aspectos de prácticas de campo con alumnos.

Sin embargo, el manejo y uso de esta tecnología podría estar limitada por su costo de acceso. El equipo utilizado, el *Mavic 2 Pro*, representa un costo de inversión de, al menos, \$25,000, por lo que muchas instituciones educativas no lo pueden adquirir. Además, se necesita de capacitación profesional para el buen manejo y obtención de datos, por lo que, las instituciones que tienen mayor éxito son aquellas que conforman redes de investigación y grupos multidisciplinarios.

Nos interesa que los futuros y actuales investigadores, estudiantes, prestadores de servicios técnicos y los actores involucrados en el sector forestal, aprendan y se capaciten en el uso de drones para usarlos en los tratamientos silvícolas, identificar especies, conteo de árboles, estructura de la vegetación, cálculo de biomasa y carbono, planificación de caminos forestales, englobando lo que hoy se conoce como Silvicultura 4.0.

En México, se comienza a reconocer la importancia de estos avances tecnológicos en el desarrollo de planes y programas de estudio a nivel licenciatura. En la UNAM, desde hace más de siete años se imparte la asignatura de Uso y manejo de drones para estudiantes de las licenciaturas en Ciencias Ambientales y Tecnologías para la Infor-

mación en Ciencias. Los planes de estudio de Ciencias Ambientales y Ciencias Agroforestales de la UNAM, contemplan algunos de los principios de la Silvicultura 4.0. La importancia de este concepto ha llevado a propuestas educativas innovadoras en los Tecnológicos de Estudios Superiores que ofertan en sus opciones educativas, temas relacionados con el aprovechamiento forestal.

## Conclusiones

1. El modelo utilizado como herramienta (*Mavic 2 Pro DJI*), permitió llevar a cabo la toma de datos necesarios, proporcionando elementos técnicos mínimos suficientes para incursionar en estudios de silvicultura en el campo de la investigación.
2. *Mavic 2 Pro DJI* constituye un equipo de fácil manejo, útil para el aprendizaje de nuevas metodologías asociadas a la Silvicultura 4.0.
3. Proporciona elementos técnicos mínimos suficientes para incursionar en estudios de silvicultura en el campo de la investigación.
4. El uso de las nuevas tecnologías en el área forestal, se proyecta a corto plazo como una herramienta educativa imprescindible para el estudio de los bosques.

## Literatura citada

- Aceto, G., V. Persico y A. Pescapé. (2019). A survey on information and communication technologies for industry 4.0: State-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3467-3501.
- Ancira-Sánchez, L. y E.J. Treviño. (2015). Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques*, 21, 77-91.
- Atzori, L., A. Iera y G. Morabito. (2017). Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm. *Ad Hoc Networks*, 56, 122-140.
- Birdal, A.C. (2017). *Determination of tree heights using unmanned air vehicles*. Tesis doctoral. Anadolu University, Turquía.
- Brettel, M., N. Friederichsen, M. Keller y M. Rosenberg. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an Industry 4.0 perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 8(1), 37-44.
- Céspedes, J.E.S. y J.N.P. Castillo. (2008). LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano. *Ingeniería*, 13(1), 67-76.
- Dash, J., D. Pont, R. Brownlie, A. Dunningham, M. Watt y G. Pearse. (2016). Remote sensing for precision forestry. *New Zealand Journal of Forestry*, 60(4), 15-24.
- de Castro, A.I., Y. Shi, J.M. Maja y J.M. Peña. (2021). UAVs for Vegetation Monitoring: Overview and Recent Scientific Contributions. *Remote Sensing*, 13(11), 2139.
- Duinker, P. N. (2001). Criteria and indicators of sustainable forest management in Canada: progress and problems in integrating science and politics at the local level. *Criteria and indicators for sustainable forest management at the forest management unit level*, (38), 7-27.
- Dyck, B. (2003, June). Precision forestry—The path to increased profitability. In *Proceedings of the Second International Precision Forestry Symposium*. University of Washington, Seattle, WA (Vol. 2003, pp. 3-8).
- Feng, Y. y J.F. Audy. (2020). Forestry 4.0: a framework for the forest supply chain toward Industry 4.0. *Gestão & Produção*, 27(4), e5677.
- Flores-Alanís, A.A., J.M. Rodríguez-Hernández y G. Chávez-González. (2019). La transformación de la educación en México desde la perspectiva de la Educación 4.0, pp. 103-111. En: Pérez-Aldeguer, S., y D. Akombo (eds.). *Research, technology and best practices in education*. Adaya Pres, Eindhoven, Netherlands.
- Gallardo-Salazar, J.L. y M. Pompa-García, C.A. Aguirre-Salado, P.M. López-Serrano y A. Meléndez-Soto. (2020). Drones: technology with a promising future in forest management. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61), 27-50.
- Gallardo-Salazar, J.L., y M. Pompa-García. (2020). Detecting individual tree attributes and multispectral indices using unmanned aerial vehicles: applications in a pine clonal orchard. *Remote Sensing*, 12(24), 4144.
- Kellner, J.M., J. Armston, M. Birrer, K.C. Cushman, L. Duncanson, C. Eck, C. Fallegger, B. Imbach, K. Kral, M. Krucek, J. Trochta, T. Vrska y C. Zraggen. (2019). New opportunities for forest remote sensing through ultra-high density drone lidar. *Surveys in Geophysics*, 40, 959-977.
- Lu, D., Q. Chen, G. Wang, L. Liu, G. Li y E. Moran. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1), 63-105.
- Meneses, V. A. B., Téllez, J. M. y Velasquez, D. F. A. (2015). Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. @ limentech, *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(1), 28-40.
- Maté Jiménez, C. (2014). Big data. Un nuevo paradigma de análisis de datos.
- Manual de usuario del Mavic 2 Pro/Zoom, 2018.
- Moskal, L.M., T. Erdody, A. Kato, J. Richardson, G. Zheng y D. Briggs. (2009). Lidar applications in precision forestry. *Proceedings of Silvilaser*, 154-163.
- Peterson, B., Dubayah, R., Hyde, P., Hofton,

- M., Blair, J. B. y Fites-Kaufman, J. (2007). Use of LIDAR for forest inventory and forest management application. In In: McRoberts, Ronald E.; Reams, Gregory A.; Van Deusen, Paul C.; McWilliams, William H., eds. Proceedings of the seventh annual forest inventory and analysis symposium; October 3-6, 2005; Portland, ME. Gen. Tech. Rep. WO-77. Washington, DC: US Department of Agriculture, Forest Service: 193-202. (Vol. 77).
- Pinno, B.D., K.L. Hossain, T. Gooding y V. J. Lieffers. (2021). Opportunities and Challenges for Intensive Silviculture in Alberta, Canada. *Forests*, 12(6), 791.
- Reutebuch, S. E., Andersen, H. E., and McGaughey, R. J. (2005). Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of forestry*, 103(6), 286-292.
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5).
- Sahal, R., S.H. Alsamhi, J.G. Breslin y M.I. Ali. (2021). Industry 4.0 towards Forestry 4.0: Fire detection use case. *Sensors*, 21(3), 694.
- Santos, L.M.D., B.D.S. Barbosa y A.D. Andrade. (2019). Use of remotely piloted aircraft in precision agriculture: a review. *Dyna*, 86(210), 284-291.
- Singh, R., A. Gehlot, S.V. Akram, A.K. Thakur, D. Buddhi y P.K. Das. (2021). Forest 4.0: Digitalization of forest using the Internet of Things (IoT). *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*.
- Tang, L. y G. Shao. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forests Research*, 26(4), 791-797.
- Tokekar, P., J. Vander Hook, D. Mulla y V. Isler. (2016). Sensor planning for a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1498-1511.
- Wei, J., Q. Wang, J. Sun y J. Gao. (2010). High-resolution imaging of a long-distance target with a single-slit streak-tube lidar. *Journal of Russian Laser Research*, 31(4), 307-312.
- Zou, W., J. Weipeng, C.S. Chen, Y. Lu y H. Song. (2019). A survey of big data analytics for smart forestry. *IEEE Access*.