



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**BIBLIOTECA INFOTEC
VISTO BUENO DE TRABAJO TERMINAL**

Maestría en Dirección Estratégica de las Tecnologías de Información y Comunicación
(MDETIC)

Ciudad de México, a 5 de enero de 2024

**UNIDAD DE POSGRADOS
PRESENTE**

Por medio de la presente se hace constar que el trabajo de titulación:

"Drones agrícolas, clave para la adopción y transición hacia la agricultura 4.0 en México"

Desarrollado por el alumno: **Juan Manuel Godoy Navarro**, bajo la modalidad del **Diplomado en Derecho, TIC e Innovación del INFOTEC** cumple con el formato de Biblioteca, así mismo, se ha verificado la correcta citación para la prevención del plagio; por lo cual, se expide la presente autorización para entrega en digital del proyecto terminal al que se ha hecho mención. Se hace constar que el alumno no adeuda materiales de la biblioteca de INFOTEC.

No omito mencionar, que se deberá anexar la presente autorización al inicio de la versión digital del trabajo referido, con el fin de amparar la misma.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviar un cordial saludo.

Mtro. Carlos Josué Lavandeira Portillo
Director Adjunto de Innovación y Conocimiento

Jah CJLP/jah

C.c.p. Felipe Alfonso Delgado Castillo.- Gerente de Capital Humano.- Para su conocimiento.
Juan Manuel Godoy Navarro.- Alumno de la Maestría en Dirección Estratégica de las Tecnologías de Información y Comunicación (MDETIC).- Para su conocimiento.

Avenida San Fernando No. 37, Col. Toriello Guerra, CP. 14050, CDMX, México.
Tel: 55 5624 2800 www.infotec.mx



INFOTEC CENTRO DE INVESTIGACIÓN E
INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN

DIRECCIÓN ADJUNTA DE INNOVACIÓN Y
CONOCIMIENTO
GERENCIA DE CAPITAL HUMANO
POSGRADOS

“DRONES AGRÍCOLAS, CLAVE PARA LA ADOPCIÓN Y TRANSICIÓN HACIA LA AGRICULTURA 4.0 EN MÉXICO”

Bajo la modalidad de Diplomado
Que para obtener el grado de MAESTRO EN
DIRECCIÓN ESTRATÉGICA DE LAS
TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y
COMUNICACIÓN

Presenta:

Juan Manuel Godoy Navarro

Ciudad de México, noviembre, 2023

DRONES AGRÍCOLAS, CLAVE PARA LA ADOPCIÓN Y TRANSICIÓN HACIA LA AGRICULTURA 4.0 EN MÉXICO

*Agricultural drones, key to adoption and transition
towards agriculture 4.0 in Mexico*

Juan Manuel Godoy Navarro ^{1*}

RESUMEN

LA AGRICULTURA 4.0 ES UN ENFOQUE REVOLUCIONARIO QUE UTILIZA TECNOLOGÍAS DE VANGUARDIA PARA IMPULSAR LA INNOVACIÓN Y MEJORAR LA EFICIENCIA EN EL SECTOR AGRÍCOLA. UNA TECNOLOGÍA CLAVE PARA INICIAR LA ADOPCIÓN Y TRANSICIÓN HACIA ESTA NUEVA ERA SON LOS DRONES AGRÍCOLAS. EN ESTE TRABAJO BUSCAREMOS EXPLORAR EN DETALLE SUS APLICACIONES Y USOS PRIMORDIALES, JUNTO CON SUS CARACTERÍSTICAS, COMPONENTES Y LAS REGULACIONES QUE GUÍAN SU USO EN MÉXICO.

PALABRAS CLAVE: Agricultura 4.0, agroindustria 4.0, agricultura de precisión, agricultura inteligente, drones agrícolas, tecnología agrícola.

ABSTRACT

Agriculture 4.0 is a revolutionary approach that uses cutting-edge technologies to drive innovation and improve efficiency in the agricultural sector. A key technology to initiate the adoption and transition to this new era is Agricultural Drones. In this work we will seek to explore in detail its primary applications and uses, along with its characteristics, components and the regulations that guide its use in Mexico.

KEYWORDS: *Agriculture 4.0, agroindustry 4.0, precision agriculture, smart farming, agricultural drones, agricultural technology.*

^{1*} Lic. en Informática, manuelgodoy.jmgn@gmail.com;

1. Introducción

La Agricultura 4.0 se basa en la idea de aplicar la digitalización, la automatización y la inteligencia artificial en todas las etapas del ciclo agrícola, desde la producción e industrialización hasta la comercialización. La digitalización implica la recolección masiva de datos (como parámetros del suelo, patrones climáticos), mientras que la automatización permite realizar tareas agrícolas de forma autónoma y eficiente (como el uso de drones para aspersión o robots agrícolas para monitoreo de enfermedades). Por último, la inteligencia artificial se utiliza para analizar los datos recopilados y tomar decisiones informadas.

La Agricultura 4.0 plantea un panorama lleno de desafíos y oportunidades para los países en desarrollo, ya que implica la transición de tecnologías manuales y basadas en la fuerza animal hacia sistemas automatizados y mecanizados, con el objetivo de reducir la brecha digital.

1.1 Descripción del proyecto

Para ayudar a comprender el avance tecnológico que representa la Agricultura 4.0 en México, se propone exponer el caso del uso de Drones Agrícolas, como el primer paso para adoptar la tecnología y adaptar al sector agrícola a esta nueva tendencia tecnológica, bordeando la barrera que representan las limitaciones en infraestructura, tecnología y capacidades técnicas de nuestro país.

De manera general, con los drones agrícolas podemos entender claramente los componentes básicos de recolección masiva de datos, su interpretación y análisis, y la integración con otras tecnologías. Abordaremos aplicaciones específicas, como: Mapeo, inspección, fertilización e irrigación automatizada. Explicaremos los componentes de un dron, requisitos para operar en México y los resultados que se pueden esperar en el campo mexicano.

1.2 Planteamiento del problema

Entre los agricultores y las empresas agrícolas existe un creciente interés en las tecnologías que se integran con la Agricultura 4.0, sin embargo, hay varias

barreras para la adopción en México. Una de ellas es el alto costo de la tecnología. El costo inicial de adquirir e instalar tecnologías de Agricultura 4.0 puede ser una barrera para muchos agricultores. Otro desafío es la falta de capacitación y apoyo. Los agricultores necesitan capacitación sobre cómo utilizar estas tecnologías, y requieren acceso a servicios de apoyo, como mantenimiento y reparación.

Entre las tecnologías clave que forman parte de la Agricultura 4.0 se incluyen los Drones Agrícolas, que son drones equipados con cámaras, sensores, tanques de pulverización, boquillas y sistemas de control que tienen una amplia gama de usos en el sector agrícola. Sin embargo, en las comunidades rurales de México, la falta de formación limita su aprovechamiento. La escasez de programas educativos y de capacitación especializados ha dejado a los agricultores sin las habilidades e información necesarias para conocer y utilizar esta tecnología de manera efectiva.

1.3 Objetivo general

Proporcionar una visión comprensiva y apreciativa del papel crucial que los drones desempeñan en la agricultura moderna, como tecnología clave para la adopción y transición hacia la Agricultura 4.0 en México.

1.4 Objetivos específicos

1. Definir el concepto de Agricultura 4.0 así como las tecnologías, componentes y beneficios que la integran.
2. Conocer la definición, características y componentes principales de un dron.
3. Proporcionar a los agricultores y trabajadores rurales casos de referencia del uso y operación de Drones Agrícolas en cultivos reales.
4. Conocer las normas y regulaciones mexicanas para el uso de drones.

1.5 Resultados esperados

1. Fomentar la modernización y aumento de la competitividad de los agricultores, promoviendo la introducción de Drones Agrícolas como una herramienta moderna y avanzada que generará nuevos empleos a trabajadores rurales y les permita dar el primer paso hacia la Agricultura 4.0.

2. Evidenciar con los Drones Agrícolas la detección temprana de problemas, la reducción de costos y la mayor eficiencia productiva al automatizar tareas de manera más precisa que los métodos tradicionales.

2. Marco Teórico

En primer lugar, se presentará la información obtenida de un análisis histórico de la agricultura y su evolución hacia la Agricultura 4.0, así como un análisis general de las tecnologías que comprende el concepto de Agricultura 4.0, sus beneficios y ventajas en la producción agrícola, también se analizará de manera general la situación actual del sector en México para la adopción de la tecnología.

2.1 La agricultura y su evolución hacia la Agricultura 4.0

La importancia de la agricultura en nuestras vidas radica en su papel fundamental para la supervivencia, el desarrollo humano y la seguridad alimentaria. La agricultura ha modelado nuestra civilización, incluso, el profesor Mark Tauger, investigador sobre la historia de la agricultura de la West Virginia University, sostiene que la agricultura es el componente que posibilita la civilización (Tauger, 2010). Tauger advierte que, mientras que las más tempranas sociedades pudieron haber conseguido sistemas de jerarquías sociales y autoridad, no llegarían a formar gobiernos, ejércitos fuertes, sistemas de clases sociales, educación y comercio, entre otros, sin el progreso de la agricultura (Restrepo *et al.*, 2023).

El progreso de la agricultura ha estado profundamente interconectado con el desarrollo industrial. Cada una de las revoluciones industriales ha inferido en la configuración de la producción y distribución agraria de alimentos (Restrepo *et al.*, 2023). La revolución industrial en la agricultura supuso un cambio radical en la estructura de la sociedad, con el auge de las ciudades y el éxodo del campo a la fábrica, pero ello no hubiese sido posible sin el desarrollo de nuevos equipos y técnicas agrarias que permitieron aumentar la producción y trasportarla hasta las

urbes (Profesional Agro, 2020). La Figura 1 resume la conexión entre revoluciones industriales y agrícolas, destacando los factores clave en cada una de ellas.

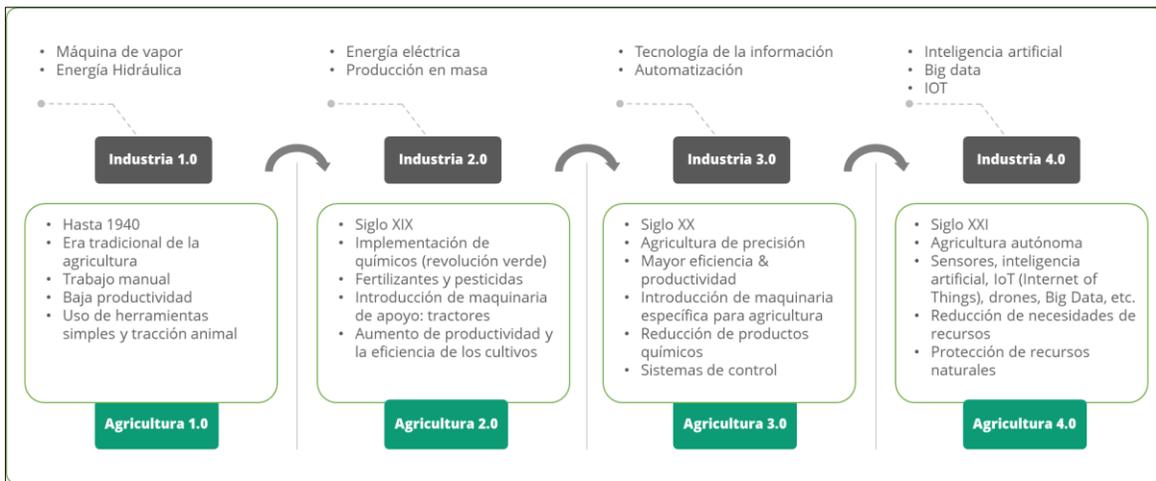


Figura 1. Interrelación de las Revoluciones Industriales y Agrícolas
(Fuente: Elaboración propia basada en Restrepo et al., 2023).

En la agricultura mundial surgen nuevos desafíos, derivados de los conflictos entre regiones y nuevos países agrícolas, el declive de la población rural y el aumento de la urbana, el calentamiento global y los cambios extensos en el modelo de producción dependiente del petróleo. La importancia del sector y de solucionar las crisis actuales generan el desafío de transformar la producción y desarrollo de la industria agrícola con ayuda de la incorporación de innovaciones tecnológicas y el desarrollo de nuevos modelos de producción, los cuales podrían asegurar un progreso y mejoría de la industria, y al mismo tiempo contribuir a la solución de las actuales crisis (Banco Interamericano de Desarrollo, 2019).

Los riesgos de la operación en campo, entre la siembra y la cosecha, muchas veces se les encomiendan a productores de economías familiares, los cuales hoy por hoy siguen siendo la mayor parte de los productores a nivel mundial (Restrepo *et al.*, 2023). En los procedimientos agrícolas actuales, las decisiones suelen basarse en experiencia previa y en investigaciones realizadas tanto en el área misma de producción, como en áreas con climas similares (Lioutas *et al.*, 2019). Schwab (2016) considera que la cuarta revolución impactará en el perfeccionamiento de las

operaciones productivas a través de la toma de decisiones oportuna mediante la captura, uso y procesamiento de datos.

La revolución agrícola 4.0, también conocida como Agricultura 4.0 o como “Smart-Farming” (Banco Interamericano de Desarrollo, 2019), es un nuevo sistema de llevar a cabo los procesos convencionales de la industria agrícola con ayuda de tecnología innovadora como robótica agrícola, informática en la nube e internet de las cosas, entre otras. La agricultura 4.0 se refiere a nuevas tecnologías agrícolas las cuales han sido y aún están siendo desarrolladas con el fin de brindar nuevas soluciones a procesos actuales dentro de la industria agrícola (De Clercq *et al.*, 2018).

Hoy en día, la tecnología que se integra en esta revolución propone el entendimiento del clima y el medio para gestionar el riesgo y la incertidumbre, resalta la importancia de la vida microscópica, las relaciones tróficas de bacterias y plantas, el estudio del suelo como organismo vivo, la racionalización del uso de agroquímicos y agua y, en general, propende por nuevas formas de producción (Cerón, 2020).

La tecnología no solo tendría beneficios en la productividad, eficiencia y facilidad de manejo y precisión para las empresas productoras, sino también permitiría la generación de información exacta, individual y en tiempo real sobre las cosechas, obteniendo así datos sobre el ambiente y otros factores que puedan estar influenciando la producción en cada uno de los diferentes ámbitos (Lundström *et al.*, 2016).

2.2 La aplicación de las tecnologías en la Agricultura 4.0

Algunas de las tecnologías clave que forman parte de los elementos de modernización de la Agricultura 4.0, son:

1. **Sensores en el campo e internet de las cosas:** Son dispositivos interconectados para detectar magnitudes físicas o químicas, convertirlas en datos digitales y transportarlos a equipos de procesamiento a través de Internet (Cerón, 2020). Su aplicación facilita la recopilación de datos en tiempo real de condiciones ambientales y del cultivo como; humedad del

suelo, temperatura, humedad relativa, calidad del aire y nivel de nutrientes, así como información de animales y la maquinaria agrícola.

2. Teledetección: Recolección remota de información en tiempo real, generalmente imágenes, para la toma de decisiones (Cerón, 2020). Los ejemplos más representativos son los satélites y los Drones agrícolas, estos últimos equipados con cámaras y sensores capturan imágenes y datos aéreos de los cultivos, lo que permite la detección temprana de enfermedades, la estimación de la salud de las plantas y la planificación de la irrigación. En muchos contextos al uso de tecnologías de teledetección se le denomina Agricultura de Precisión.
3. Big Data y procesamiento de información: Almacenamiento, procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos del pasado y el presente para convertirlos en información estratégica (Cerón, 2020). Con esta tecnología es posible conectar información histórica sobre insumos agrícolas y rendimientos con detalles del clima y del mercado, incluyendo información en tiempo real sobre el suelo y las condiciones de enfermedades (Mooney *et al.*, 2019), para identificar tendencias o patrones de gran importancia para los agricultores y consumidores.
4. Servicios de localización: Uso de sistemas de información geográfica como el GPS para planificar cultivos, realizar muestreo de suelos y controlar equipos de forma remota (Cerón, 2020).
5. Computación en la nube: Uso de redes de computadores que permiten el trabajo en equipo. Facilita coordinar la reacción a condiciones climáticas, recursos y equipos disponibles o manejos fitosanitarios, entre muchas cosas (Cerón, 2020). Es donde se almacenan los datos y la información digital recopilada en campo.
6. Trazabilidad y seguimiento: Tecnologías como el blockchain hacen posible a los cultivadores y consumidores conocer el proceso completo de producción de un alimento (Cerón 2020). Esta tecnología da transparencia en la cadena de suministro agrícola, garantizando la autenticidad de los productos y facilitando el comercio justo.

7. Inteligencia artificial: Sistemas informáticos inteligentes capaces de procesar información y aprender de ella para facilitar la gestión de los cultivos o el uso de recursos escasos como el agua (Cerón, 2020). Esta tecnología permite el análisis de datos agrícolas a gran escala, el desarrollo de modelos predictivos y la automatización de tareas agrícolas, mejorando la eficiencia y la precisión en la toma de decisiones.

En el transcurso de los últimos años, como resultado de investigaciones en campo, se han podido identificar las siguientes ventajas del uso de estas tecnologías (Wandel et al., 2021):

- Mayor aprovechamiento del terreno.
- Mayor eficiencia en los procesos de producción.
- Mejor output con menor input.
- Aumento de rentabilidad.
- Menores gastos de mano de obra.
- Mejor comunicación.
- Menores niveles de desperdicio.
- Detección de riesgos, plagas y catástrofes más fácilmente.
- Mejora en la utilización de recursos.
- Mejora en la calidad del producto.
- Posibilidad de entrar a mercados más importantes.
- Disponibilidad inmediata de información.
- Posibilidad de producir en lugares donde no era posible antes.

Sin embargo, a pesar de las ventajas y beneficios de la tecnología, hay todavía muchos desafíos, tales como:

1. El alto costo de la tecnología: El costo de la tecnología agrícola puede ser una barrera para algunos agricultores.
2. La necesidad de datos: La Agricultura 4.0 se basa en datos, y los agricultores pueden no contar con la infraestructura necesaria para recopilar, almacenar y transmitir los datos.

3. La necesidad de capacitación: Los agricultores pueden requerir capacitación para utilizar las nuevas tecnologías agrícolas.

La brecha digital que suponen estos desafíos para implementar la tecnología puede representar un aumento en la desigualdad, no solo entre grandes y pequeños productores, también entre zonas urbanas, semiurbanas y rurales, y en las poblaciones según género, edad y aptitudes digitales (Ceron, 2020).

Es precisamente este ritmo acelerado de la tecnología, la competencia que origina y la globalización de los mercados, los que han creado un entorno o un ecosistema, donde sólo las empresas que sean capaces de aprender a paso rápido y continuo, lograrán mantenerse con éxito (Soto *et al.*, 2019).

2.3 Condiciones en el campo mexicano para la Agricultura 4.0

México es ya el 11º productor de alimentos y el 7º exportador mundial. “La capacidad creativa y la innovación serán el dinamismo que impulse las soluciones. El futuro de la agricultura y de la alimentación está en la ciencia y la innovación”, señala Laura Tamayo, directora de Asuntos Públicos, Comunicaciones y Sustentabilidad de Bayer de México y vicepresidenta de Comunicación del CNA (CNA, 2023). Por lo que es importante que cada vez más empresas, logren desarrollar capacidades tecnológicas que les permitan internacionalizarse y aumentar este índice (Soto *et al.*, 2019).

Para los productores, la adopción de nuevas tecnologías debe cumplir con la condición de generar un mayor ingreso, una vez considerados los costos de adquisición. Esta condición puede cumplirse bajo diferentes parámetros de acuerdo con una serie de condiciones relacionadas con la producción, tales como tipo de cultivo, región de producción, tecnología actualmente disponible, precios de los productos, así como el componente impactado por la nueva tecnología (Elizondo *et al.*, 2023).

La incorporación de la Agricultura 4.0 en el campo mexicano, si bien depende de diferentes factores y características geográficas, solo es posible si se dan las

condiciones mínimas de operación y adopción requeridas para el desempeño de las nuevas tecnologías, las tres dimensiones más relevantes son (Elizondo *et al.*, 2023):

1. Infraestructura de telecomunicaciones: acceso a servicios de 3G y 4G.
2. Nivel educativo, y uso y adopción de TIC.
3. Mecanización del trabajo agrícola.

Para efectos de este trabajo, presentaremos de manera general la Infraestructura de telecomunicaciones en México, como un elemento habilitador básico, ya que es una barrera natural para la adopción de las tecnologías antes mencionadas.

De acuerdo con el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) 2020, el 81% de las unidades de producción agrícola en México reportan tener acceso a tecnologías 3G, mientras que el 75% de ellas reportan tener acceso a tecnologías 4G. En la figura 2 vemos que el porcentaje de unidades productivas (UP) con acceso a este servicio en los estados de Oaxaca, Guerrero, Campeche y Quintana Roo es el más bajo del país. Por otro lado, las unidades productivas de los estados del nororiente y occidente del país reportan un mayor acceso a este servicio (Elizondo *et al.*, 2023).

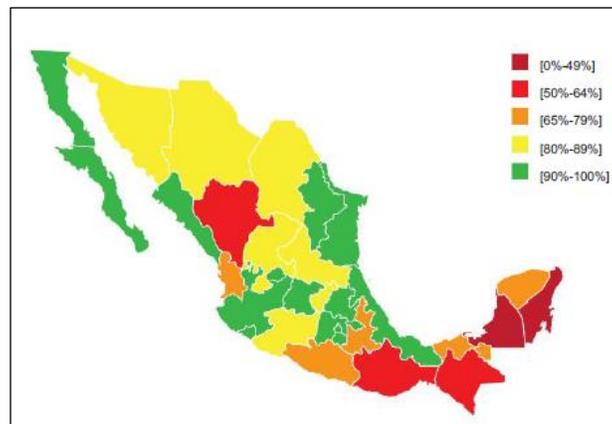


Figura 2. Estados según su nivel de cobertura móvil (Fuente: Elizondo *et al.*, 2023).

Si bien existen áreas de oportunidad para desarrollar un marco de potenciales acciones de política pública para mejorar las barreras de telecomunicaciones y promover la adopción de tecnologías en México, este desarrollo queda fuera de nuestro alcance. El enfoque que abordaremos será el de buscar una opción que favorezca la adaptación de los productores mexicanos a la Agricultura 4.0.

3. Metodología

3.1 Diseño de la investigación

El diseño y desarrollo de la investigación aplicará un método documental, descriptivo y exploratorio con enfoque mixto, comenzando con exploración de información cualitativa y después se analizarán datos cuantitativos.

El objetivo de la investigación cualitativa será exponer: 1) La historia e importancia de la agricultura y su evolución hasta la era moderna, 2) Explorar los avances tecnológicos para conocer los beneficios, las herramientas y tecnologías que integran el concepto de Agricultura 4.0, 3) Conocer en particular la aplicación y el uso de los Drones Agrícolas, en el contexto actual del campo mexicano.

El análisis de datos cuantitativos se enfocará en: 1) Conocer el índice de acceso y uso de TICs e Infraestructura de telecomunicaciones en México.

3.2 Fases y etapas de la recopilación de datos

Fase cualitativa:

- Etapa documental: Se realizará una búsqueda, revisión y selección de artículos, tesis y libros sobre la historia, beneficios y efectos de la agricultura, para desarrollar las bases del contenido, posteriormente se realizará el mismo proceso para el concepto de “Agricultura 4.0”.
- Etapa descriptiva: Se realizará una búsqueda, en publicaciones especializadas del sector en México, para examinar la información estadística del nivel de preparación para la adopción de nuevas tecnologías.

Fase cuantitativa:

- Etapa exploratoria: Incluye la colaboración con una empresa especializada en la Agricultura de Precisión, buscando analizar la experiencia y punto de vista de un actor representante del sector. En esta etapa se buscará identificar escenarios reales de implementación, uso y operación de Drones Agrícolas.

3.3 Actividades que se realizarán en cada fase o etapa

1. Se realizará la búsqueda de artículos y estudios con palabras clave como “agricultura”, “historia de la agricultura”, “evolución de la agricultura”, “agricultura 4.0”, “agricultura inteligente”, “agricultura 4.0 en México”, “conectividad en México”, “nuevas tecnologías agricultura”, “drones agrícolas” y “agricultura de precisión” en bases de datos como Google Scholar (GOOGLE, 2023), con el fin de identificar la presencia de los términos antes mencionados en el título, resumen y palabras clave de los resultados.
2. Para identificar los datos estadísticos del sector agrícola se recurrirá a la publicación anual especializada del Consejo Nacional Agropecuario (CNA, 2023). Para los datos estadísticos del nivel de preparación del país para la adopción de nuevas tecnologías se tomará como referencia el trabajo realizado por el portal especializado Agro Productividad (Elizondo *et al.*, 2023). Por último, para la información de referencia sobre el conocimiento de las nuevas tecnologías en la industria agrícola se utilizará un estudio de la Universidad Pontificia Comillas (Wandel *et al.*, 2021).
3. Se colaborará con una empresa especializada (Precisión Agrícola, 2023), con el fin de conocer a mayor detalle la experiencia en la aplicación de las tecnologías de Drones en México, así como para identificar casos reales de la implementación tecnológica en el campo mexicano.

4. Propuesta de atención al problema

4.1 Introducción a los drones

Según la definición de la Real Academia Española, un Dron se describe como una “aeronave no tripulada” (RAE, 2023), sin embargo, en la Tabla 1 se presentan varias denominaciones para definir un dron.

Tabla 1. Denominaciones de dron (Fuente: Elaboración propia basada en UMILES, 2022).

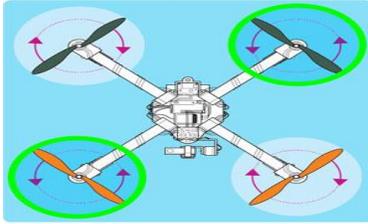
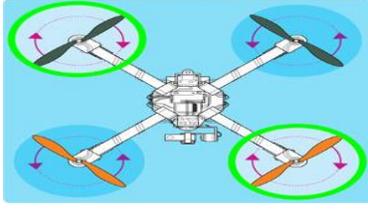
RPA “Remotely Piloted Aircraft” , se traduce como “Aeronaves Tripuladas por Control Remoto”.	Es cualquier tipo de aeronave no tripulada, que es controlada de manera remota por un piloto a cierta distancia, a diferencia de otros drones que pueden ser programables y que ejecutan sus acciones de manera autónoma.
RPAS “Remotely Piloted Aircraft Systems” , se traduce como “Sistema de Aeronaves Tripuladas por Control Remoto”.	Este significado incluye tanto a la aeronave, como al enlace de comunicaciones y la estación en tierra desde donde se controla al dron.
UAV “Unmanned Aerial Vehicle” , se traduce como “Vehículo Aéreo No Tripulado”.	Este es el término global para definir a los drones y se refiere a cualquier aeronave no tripulada que sea controlada por un piloto o mediante un programa informático.
UAS “Unmanned Aerial System” , se traduce como “Sistema Aéreo No Tripulado”.	Este término hace referencia al sistema que se emplea para el vuelo de un vehículo aéreo no tripulado, es decir, al sistema de vuelo de un UAV.

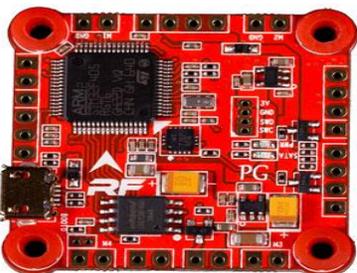
En este trabajo nos referiremos a UAS, UAV y RPA como “Dron”.

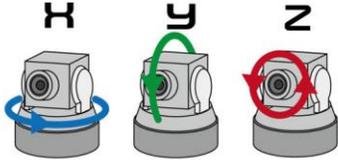
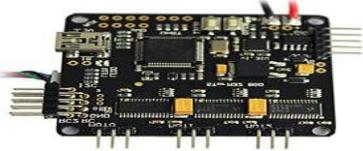
4.1.1 Partes de un dron

Los drones, contruidos con materiales, componentes y compuestos ligeros (Tabla 2), representan una revolución en la tecnología aérea al reducir su peso y tamaño, permitiendo así una mayor capacidad de maniobra.

Tabla 2. Componentes de un dron (Fuente: Elaboración propia en colaboración y con información de Precisión Agrícola, 2023).

PARTE	ESPECIFICACIÓN	IMAGEN
Chasis	Es el soporte para las demás piezas, es decir la estructura central y puede tener varias formas.	
Hélices estándar	Son aquellas que giran en sentido contrario a las agujas del reloj. (son las encerradas en un círculo verde).	
Hélices inversas	Son las que giran en el sentido de las agujas del reloj. (son las encerradas en un círculo verde)	

<p>Motores sin escobillas (BRUSHLESS)</p>	<p>La mayoría de los drones utilizan este tipo de motores, ya que son eficientes y silenciosos. Uno por cada brazo.</p>	
<p>Soporte del motor</p>	<p>Puede estar integrado con otros componentes como los brazos o el motor.</p>	
<p>Tren de aterrizaje</p>	<p>Ésta es una parte útil en aquellas aeronaves que necesitan que haya una cantidad de espacio considerable entre la parte principal de su cuerpo y el suelo al aterrizar.</p>	
<p>Brazos</p>	<p>En algunos son parte del cuerpo principal, en otros se montan de manera independiente. Los brazos cortos aumentan la maniobrabilidad y los largos la estabilidad.</p>	
<p>Parte central del cuerpo</p>	<p>Esta parte conecta con todos los brazos. suele albergar las baterías, placas electrónicas principales, procesadores de aviónica, cámaras y sensores.</p>	
<p>Variadores</p>	<p>El controlador electrónico de velocidad (Electronic Speed Controller – ESC) se encarga de variar la velocidad del motor, su dirección y a veces actuar como freno dinámico.</p>	
<p>Controlador de vuelo</p>	<p>Se encarga de interpretar los datos recibidos por el receptor de señal de radiofrecuencia (por ejemplo, la emitida por el mando de radiocontrol del piloto), el módulo GPS, el sensor de carga de la batería y los sensores de a bordo de los que depende el vuelo.</p>	

Módulo GPS	Combina el receptor GPS con el magnetómetro para proporcionar la latitud, longitud, elevación y rumbo desde un solo dispositivo.	
Receptor	Permite recibir las señales del radio del piloto.	
Antena	Para captar o emitir señales de radiofrecuencia.	
Batería	Normalmente son del tipo LiPo (polímero de litio) pues ofrecen la mejor combinación en el mercado de densidad energética, potencia y vida útil.	
Controlador de la batería	Informa sobre el nivel de carga de la batería.	
Gimbal o Cardán	Es sobre donde se monta la cámara u otros sensores. Crea estabilidad X, Y y Z.	
Motor del Gimbal	Permite al cardán realizar los movimientos mecánicos que estabilizan la cámara u otro sensor que se incorpore.	
Unidad de control del Gimbal	Permite el control de los motores del gimbal como si fueran servomotores estándar.	
Cámara	Se suelen utilizar cámaras deportivas como las de la marca GoPro, ligeras y de pequeño tamaño, pero con capacidad para hacer fotografías de calidad y, sobre todo, grabar vídeo, a ser posible transmitido en tiempo real al piloto.	

4.2 Clasificación de drones

Los drones se dividen en 3 tipos: Drones de ala rotatoria o multirrotor (Figura 3), drones de ala fija (Figura 4) y el Híbridos de ambos drones (Figura 5). Los drones de tipo ala rotatoria tienen estabilidad en el aire y pueden mantenerse en este ambiente. Los drones de ala fija presentan vuelos a mayor distancia, velocidad y consumen menos energía, lo que les brinda un mayor tiempo en sus operaciones, además de que su diseño está hecho para que las fuerzas aerodinámicas lo ayuden a permanecer en vuelo (Tuesta, 2019). Los drones híbridos concilian alas y rotores para garantizar velocidad y precisión (Agrofy, 2023).



Figura 3. Dron multirrotor - DJI Matrice 300, tiene los rotores de manera horizontal (Fuente: Wingtra, 2021).



Figura 4. Dron de ala fija - WingtraOne GEN II, tiene al menos un rotor colocado de manera vertical (Fuente: Wingtra, 2021).



Figura 5. Dron Híbrido - Dronemog 25e (Fuente: Agrofy, 2023).

4.3 Aplicación de los drones en la agricultura

Para la adopción y transición hacia la Agricultura 4.0 en México, se propone el uso de drones para dos tareas principales: Monitoreo y Aspersión de cultivos.

4.3.1 Drones para Monitoreo de Cultivos

Tomando como base la clasificación de los drones, en la Figura 6 se muestra una comparación de drones aplicado a actividades de Mapeo, para Monitoreo; en la figura se presenta visualmente el resultado de una cobertura máxima con un solo vuelo a 1.9 cm por pixel (0.75 pulgadas/px) de resolución espacial (Wingtra, 2021). Como referencia, las cámaras de los drones proveen imágenes con una resolución de hasta dos centímetros por píxel, superiores a las imágenes satelitales cuya definición puede ser, en el mejor de los casos, de 50 centímetros por pixel (Milenio, 2019). Esta comparación de 3 diferentes tipos de drones nos sirve como referencia para alcance y cobertura de monitoreo.



Figura 6. Comparación de drones de mapeo. WingtraOne RGB61 II - 310 hectáreas (766 acres) Altitud de 120 metros (400 pies). Otros drones de ala fija - 170 hectáreas (420 acres) Altitud de 93 metros (305 pies). Multicópteros drones - 29 hectáreas (71 acres) Altitud de 69 metros (226 pies). (Fuente: Wingtra, 2021).

4.3.2 Drones para Aspersión de Cultivos

Para este tipo de actividades, las consideraciones de los drones se centran en la capacidad de carga (para transportar insumos agrícolas: herbicidas, pesticidas

y fungicidas, así como fertilizantes) y la autonomía de vuelo, lo que afecta directamente el precio y requerimientos de operación. Con estos drones en la agricultura se busca optimizar el uso de insumos (agua, fertilizantes, pesticidas, etc.) para dar a cada planta exactamente lo que necesita para crecer de manera óptima. A continuación, se muestra en la Tabla 3 una serie de los drones profesionales más comunes, con sus especificaciones de carga.

Tabla 3. Drones profesionales para aspersión (Fuente: Elaboración propia basada en HSE-UAV, 2023).

MODELO DE DRON	FABRICANTE	CAPACIDAD DE CARGA	PRECIO ESTIMADO USD
Hylio AG-272	Hylio (Estados Unidos)	18 Gal.	\$78,500
Hylio AG-230	Hylio (Estados Unidos)	8 Gal.	\$40,000
Hylio AG-216	Hylio (Estados Unidos)	4.2 Gal.	\$27,200
Hylio AG-210	Hylio (Estados Unidos)	2.6 Gal.	\$22,500
DJI Agras T50	DJI (China)	70 L	\$53,000
DJI Agras T40	DJI (China)	40 L	\$19,999
DJI Agras T30	DJI (China)	30 L	\$15,999
DJI Agras T20	DJI (China)	20 L	\$12,499
DJI Agras T10	DJI (China)	8 L	\$10,999
XAG P100 PRO	XA	50 L	\$25,268
XAG P100	XA	40 L	\$19,999
XAG P40	XA	15 L	\$11,200

Estos drones tienen especificaciones técnicas adicionales (Tabla 4) a un dron tradicional y particulares dependiendo el modelo, por ejemplo, en el caso del AGRAS T10 (Figura 7) que es un Dron ideal para iniciar con labores de aspersión en cultivos.

Tabla 4. Especificaciones técnicas adicionales AGRAS T10 (Fuente: Elaboración propia basada en DJI, 2023).

• Ligero y resistente y confiable, elaborado con fibra de carbono.
• Tiene un tanque de pulverización con capacidad de 10 litros.
• Cobertura de rociado: Alcanza hasta 5.5 metros.
• Flujo de rociado: Puede rociar hasta 3 litros por minuto.
• Tanque de granulados, ideal para rociar fertilizantes, semillas y alimentos.
• Ancho de esparcimiento de granulados de hasta 7 metros.
• Monitoreo de peso del tanque en tiempo real.
• Luces integradas para operaciones nocturnas.
• Diseño de cuatro boquillas con una tasa de salida de hasta 2.4 litros por minuto.

<ul style="list-style-type: none"> • Un caudalímetro controla las boquillas para una pulverización uniforme y un control de volumen preciso, fundamental para la pulverización de pesticidas.
<ul style="list-style-type: none"> • El módulo de tiene una estructura herméticamente cerrada con tres capas de protección resistente al polvo y la corrosión, con certificación IP67.
<ul style="list-style-type: none"> • Equipado con cámaras FPV duales que proporciona vistas frontales y traseras claras y permite verificar el estado del vuelo.
<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento: Puede cubrir 6.7 hectáreas por hora o 40 hectáreas por día.
<ul style="list-style-type: none"> • Estructura: Su estructura de entramado plegable es resistente y fiable, lo que permite un transporte conveniente y transiciones fáciles.
<ul style="list-style-type: none"> • Radar: Cuenta con un radar digital omnidireccional para esquivar obstáculos automáticamente.
<ul style="list-style-type: none"> • Precisión: Tiene una precisión en la planificación del control remoto gracias a su sistema RTK/GNSS3.

Otros drones, como el AGRAS T30 (Figura 7), incluyen características similares, pero con capacidad de carga y autonomía de vuelo mayores.



Figura 7. Equipos de aspersión DJI Agras T10 y T30 (Fuente: Elaboración propia en colaboración y con información de Precisión Agrícola, 2023).

Los drones agrícolas están equipados con una gran cantidad de sensores e interactúan con otras tecnologías para trabajar sobre los cultivos, algunos de estas tecnologías son:

- Imágenes satelitales.
- Imágenes multiespectrales.
- Imágenes térmicas.
- Sensores y estaciones meteorológicas remotas.
- Aplicaciones para scouting en tierra.
- Ciencia de datos.

El uso de la tecnología de imágenes multiespectrales y la gestión de datos en tiempo real es una tendencia destacada en el mercado (Fortune, 2023). El resultado de esta combinación de tecnologías se traduce en soluciones que permiten cubrir áreas considerables (incluidas aquellas de difícil acceso), en un tiempo relativamente corto y a un costo relativamente bajo, para optimizar los procesos productivos, ayudar a los agricultores a detectar plagas o problemas, incluso mucho antes de que comiencen a manifestarse en los cultivos.

4.4 Uso de drones agrícolas en el campo mexicano

La agricultura con drones supone múltiples ventajas, desde el seguimiento detallado y pormenorizado de la cosecha, una mejora en el consumo de agua o una fumigación precisa a un bajo costo. Estas actividades, entre otras cosas pueden ayudar al agricultor a decidir cuándo plantar o cosechar, elegir el tipo de cultivo a planta dependiendo de las condiciones del campo.

Actualmente, el uso de drones agrícolas en México se está aplicando para ofrecer soluciones de:

- Evaluación de las condiciones y análisis de suelos,
- Siembras,
- Fertilización y fumigación de cultivos,
- Mapeo y topografía de cultivos,
- Monitorización y manejo de riego,
- Generación de inventarios de plantas,
- Seguimiento y trazabilidad del desarrollo de la salud de las plantas en campo,
- Presencia de plagas y riesgo de enfermedades,
- Optimización de los insumos y evaluación de la efectividad en sus aplicaciones,
- Y otros usos tan particulares como drones con apariencia de aves rapaces para ahuyentar el ataque de aves sobre los cultivos.

4.4.1 Casos Prácticos: Servicios de Monitoreo

Caso 1:

La aplicación de tecnología de imágenes multispectrales utilizando drones agrícolas en campos de piña, capturando datos a través de diferentes longitudes de onda de luz, permite identificar, entre otras cosas: Clorofila, Biomasa, Malezas, Modelo Digital de Elevaciones, Conjunto de Infrarrojos, Temperatura (Figura 8).

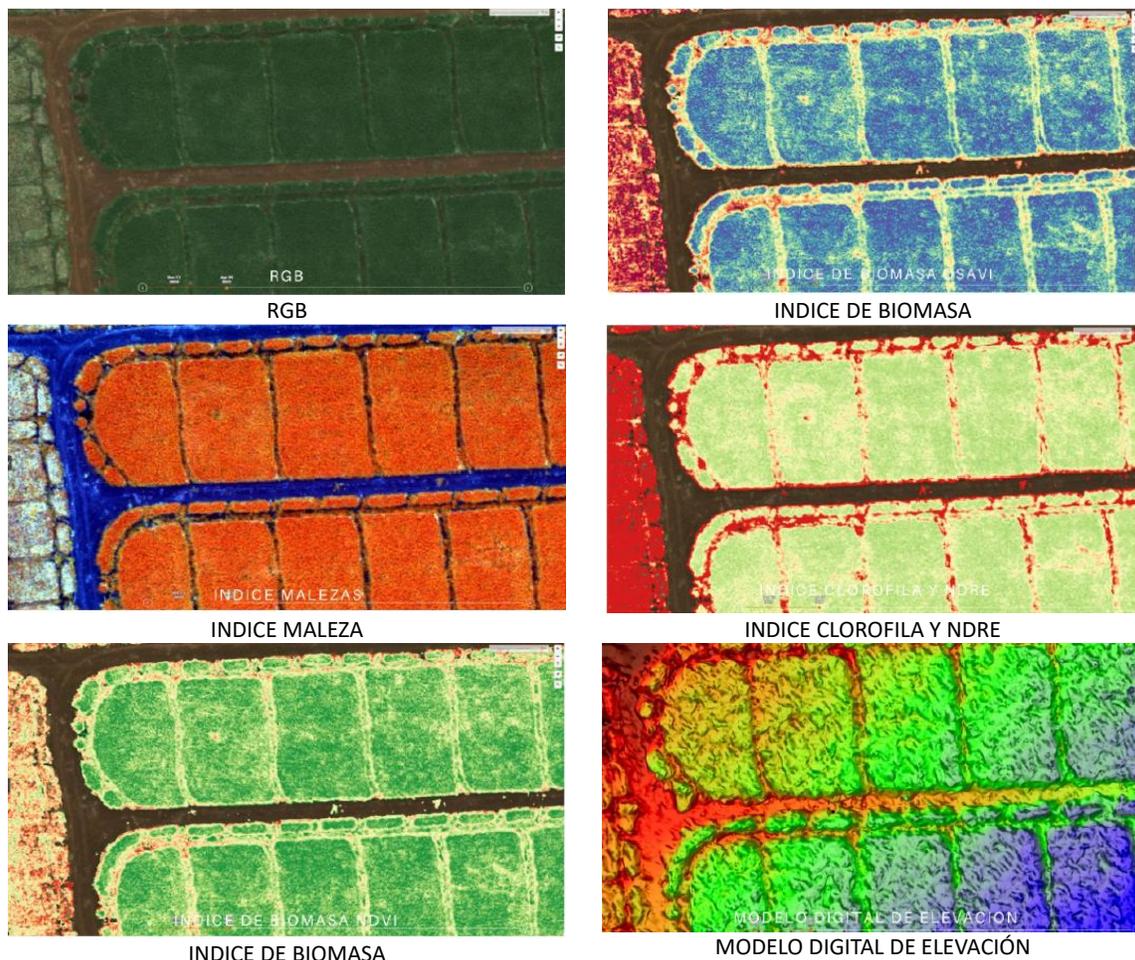


Figura 8. Ejemplo de visualización de índices Multiespectrales en cultivo de Piña (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

Caso 2:

Los Mapas NDVI que se obtienen de cada inspección multispectral de los drones agrícolas cuantifican la vegetación midiendo la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético. El mapa da una visión general del cultivo,

comparado con una vista desde diferentes fechas. Usando estos mapas se pueden tomar decisiones precisas y exactas para ayudar a mejorar consistentemente los cultivos y priorizar áreas que necesitan más atención. El NDVI pone de relieve las zonas de vegetación viva (Figura 9) y es sensible a los pequeños cambios en la productividad de las plantas cuando éstas están sometidas a estrés.

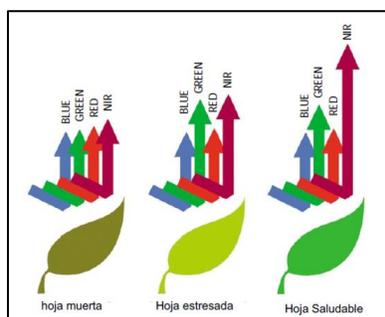


Figura 9. NDVI y sanidad vegetal (Fuente: FAO, 2023).

En este caso (Figura 10), las áreas rojas atrajeron la atención de los clientes para evaluar y recorrer estas áreas para determinar la causa. La conclusión fue que las larvas de gusano cogollero estaban teniendo un impacto negativo en el cultivo, pero actualmente estaban aisladas a las áreas rojas. Como resultado, el agricultor puede identificar con precisión las áreas para aplicar los tratamientos contra las larvas de gusano cogollero y las áreas que no se beneficiarían. Esto reduce la cantidad total de productos contra las larvas de gusano cogollero que se aplican en el campo, ahorrando dinero y con un enfoque más responsable con el medio ambiente.



Figura 10. Ejemplo de servicio de monitoreo NDVI (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

Caso 3:

Identificación de áreas que necesitan más o menos fertilizante en el cultivo. El plan de aplicación se basa en la medición del NDVI del campo con mayores volúmenes de nitrógeno aplicados en zonas con valores de NDVI más bajos y viceversa. La verificación de la tierra indica que las ubicaciones en los mapas que mostraban un NDVI más bajo (por debajo de 0,6) se debían a deficiencias de nutrientes (Figura 11).



Figura 11. Ejemplo de análisis de imágenes para aplicación de fertilizante en cultivo de maíz (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

Caso 4:

Mapa de aspersión de herbicida para identificación de las áreas del campo con las mayores poblaciones de malezas en el maíz en un sistema de hileras anchas (>40 cm de espaciamiento de las hileras) y cuando las plantas de maíz están en la etapa de crecimiento correcta (6 20 cm de diámetro visto desde arriba).

La cartografía de las malas hierbas se logra eliminando el cultivo de la imagen y buscando el material verde restante. El producto no distingue ni identifica la especie de maleza entre las hileras, pero proporciona un mapa de malezas en el que basar la aplicación (Figura 12).

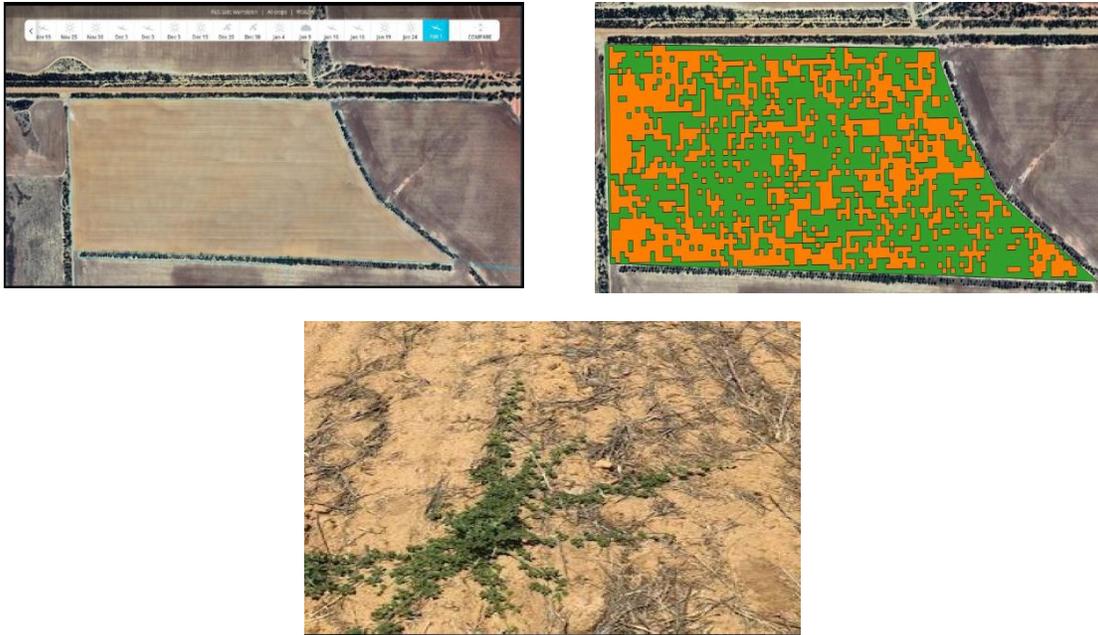


Figura 12. Ejemplo de mapas de malezas identificados según sus índices espectrales (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

Caso 5:

Por medio de vuelos de drones agrícolas de monitoreo se genera un mapa de fallas en la brotación de la caña y se calcula y se elabora un mapa de replante (Figura 13).

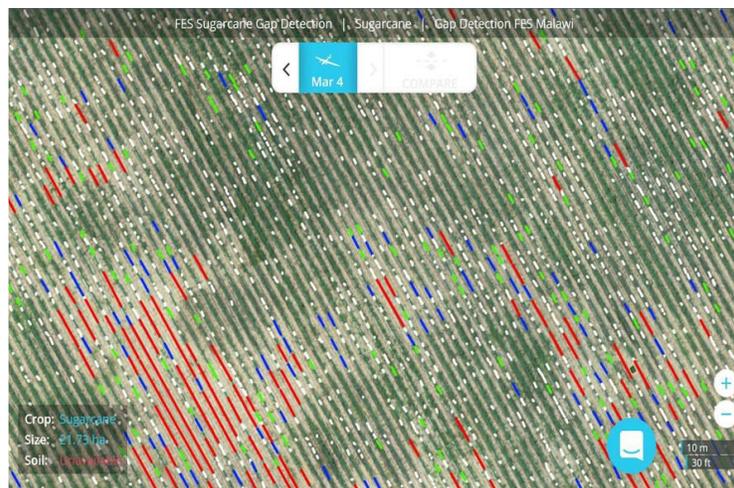


Figura 13. Ejemplo de mapa de fallas de brotación y planos de replante en caña (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

4.4.2 Casos Prácticos: Servicios de Aspersión

El uso de drones agrícolas para Servicios de Aspersión permite realizar labores de fumigación de manera más eficiente y segura, tanto para el trabajador como para el entorno. Habilita un control preciso del área de aplicación (Figura 14), lo que conlleva a un uso optimizado de agroinsumos y a una reducción en su impacto ambiental.

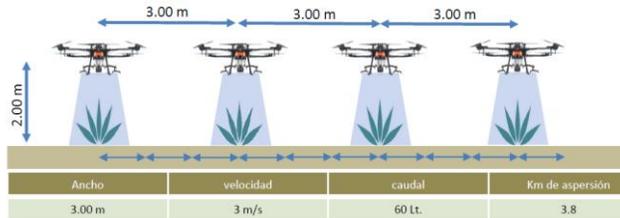


Figura 14. Ilustración de ejemplo de aspersión de precisión en Agave (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

Los drones agrícolas para fumigación funcionan equipados con sistemas de pulverización y de navegación autónoma. De esta forma, son capaces de cubrir grandes extensiones de terreno en poco tiempo y con alta precisión, incluso en zonas de difícil acceso. Esta capacidad se convierte en una ventaja destacada al compararlos con los métodos tradicionales de fumigación manual o terrestre (Figura 15).

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ASPERSIÓN				
ANÁLISIS COMPARATIVO	APLICACIÓN MANUAL CON MOCHILA		MAQUINARIA AGRÍCOLA	DRONE ASPERSIÓN
SUPERFICIE	1 HECTÁREA			
TIPO DE APLICACIÓN	HERBICIDA	FOLIAR	HERBICIDA / FOLIAR	GENERAL
GASTO DE AGUA POR HECTÁREA	100 LT	200 LT	3000 LT	10 L – 20 L
ANCHO DE ASPERSIÓN	3.2 m	1.6 m	10.5 m	5.0 m - 9.0 m
TIEMPO DE APLICACIÓN	4 h.	7 h.	1 h.	10 min.
CONDICIONES DE SUELO	Seco / húmedo	Seco	Seco / húmedo	NO APLICA
RENDIMIENTO POR DÍA	1 Ha.	1 Ha.	20 Ha.	60 Ha.
COSTO DE APLICACIÓN	\$ 400	\$ 600	\$ 400	\$ 500

Figura 15. Comparación de métodos de fumigación (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

Asimismo, los drones pueden ser programados para seguir rutas predefinidas (Figura 16), lo que permite a los agricultores planificar sistemáticamente el procedimiento de fumigación. Ello resulta en una operación más eficiente, ya que se reducen las posibilidades de sobreaplicación o subaplicación de productos químicos.



Figura 16. Ejemplo de planificación de ruta inteligente para operación autónoma (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

4.5 Proceso de trabajo

Para obtener los beneficios anteriormente mencionados, se debe realizar una implementación exitosa de los proyectos, lo que implica un proceso de trabajo con actividades de planeación, operación (figura 17) y de seguridad.



Figura 17. Proceso de trabajo operativo (Fuente: Precisión Agrícola, 2023).

Algunas consideraciones importantes que se deben agregar son:

- Regulaciones y permisos: Es necesario cumplir con las regulaciones y obtener los permisos correspondientes para operar los drones en la agricultura.
- Costos y mantenimiento: La adquisición de los drones y su mantenimiento pueden implicar costos significativos. Además, se deben considerar los gastos relacionados con la formación y capacitación de los operadores de los drones agrícolas.
- Capacitación y habilidades técnicas: Para utilizar drones agrícolas de manera eficiente, es fundamental contar con personal capacitado en su operación y en el análisis de los datos recopilados. Es importante adquirir las habilidades necesarias para utilizar las herramientas tecnológicas de manera efectiva.
- Seguridad y privacidad: El uso de drones en la agricultura puede plantear preocupaciones relacionadas con la seguridad y la privacidad. Es importante asegurarse de operar los drones de manera segura para los involucrados, disminuyendo riesgos en los siguientes rubros:
 - Seguridad para los clientes
 - Seguridad para el personal
 - Seguridad para el equipamiento
 - Seguridad para las comunidades aledañas a las operaciones

Adicionalmente se consideran los Procedimientos Operativos Estándar (POE) para la operación de drones en fumigaciones de pesticidas y gestión de la respuesta a las emergencias con pesticidas. Los pesticidas mal utilizados pueden provocar fitotoxicidad en los cultivos y provocar pérdidas de producción.

4.6 Normativa y regulación en México

En la mayoría de los países se tienen regulaciones para evitar el uso incontrolado e inadecuado de los drones. El uso de drones es regulado considerando criterios de tamaño o peso. En México la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) es el organismo que se encarga de regular la

operación de Drones bajo la NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano, incluyendo los requisitos para su registro, certificación, operación y mantenimiento (DOF, 2019). La primera regulación fue el 19 de julio de 2010, la entonces Dirección General de Aeronáutica Civil emitió la primera circular obligatoria CO AV-23/10, que fue revisada y actualizada en cuatro ocasiones.

Además de la circular antes referida, la AFAC toma como fundamento legal la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, la Ley de Aviación Civil, el Reglamento de la Ley de Aviación Civil, Reglamento Interior de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y el anexo 8 de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) que hace referencia a la aeronavegabilidad. En la Tabla 5, se detallan dichas citas.

Tabla 5. Resumen de los instrumentos jurídicos para el uso de RPAS (Fuente: Armendáriz Valdez, 2022).

PUBLICACIÓN	FECHA DE PUBLICACIÓN
CO AV 23/10	19 de julio de 2010
CO AV 23/10 R1	22 de febrero de 2013
CO AV 23/10 R2	8 de abril de 2015
CO AV 23/10 R3	31 de mayo de 2016
CO AV 23/10 R4	25 de julio de 2017
PROY-NOM-107-SCT3- 2016	20 de septiembre de 2017
LEY DE AVIACIÓN CIVIL	26 de junio de 2017
CO AV -58/19	19 de julio de 2019
NOM-107-SCT3-2019	14 de noviembre de 2019

Por lo que es necesario cumplir con las regulaciones y permisos especificados en la Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019.

5. Discusión

El uso de drones en la agricultura ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, es un mercado que en el 2022 se valoró en 4,170 millones de dólares y se proyecta que crecerá hasta 18,220 millones para el 2030, lo que representa una tasa de crecimiento anual compuesta del 20.3% durante el

periodo de pronóstico (Fortune, 2023). Sin embargo, la gestión de los datos recopilados por drones agrícolas, la escasez de pilotos capacitados y la falta de conocimientos técnicos entre los agricultores son los desafíos para el mercado (Droneearth, 2023).

5.1 Ventajas competitivas para clientes

La agricultura con drones supone múltiples ventajas (tabla 6), en tareas de monitoreo, el seguimiento detallado y pormenorizado de la cosecha puede ayudar, entre otras cosas, al agricultor a decidir cuándo plantar o cosechar, elegir el tipo de cultivo a planta dependiendo de las condiciones del campo.

Tabla 6. Ventajas competitivas (Fuente: Elaboración propia en colaboración y con información de Precisión Agrícola, 2023).

VENTAJA	DESCRIPCIÓN
Reducción de la compactación del suelo	A diferencia de los vehículos terrestres, los drones no compactan el suelo mientras realizan la aspersión. La compactación del suelo puede ser perjudicial para la salud del suelo y la productividad de los cultivos.
Reducción del escurrimiento de agroinsumos	Los drones pueden aplicar agroinsumos de manera más precisa y uniforme, con ultra bajo volumen, de tal forma que reduce el escurrimiento de estos productos hacia los cuerpos de agua o el suelo, protegiendo así el medio ambiente y la biodiversidad.
Menor consumo de combustible	Los drones, especialmente los eléctricos, suelen ser más eficientes en términos de consumo de combustible que los vehículos terrestres. Esto puede reducir las emisiones de carbono y otros gases de efecto invernadero.
Acceso a áreas difíciles de alcanzar	Los drones pueden acceder a áreas que serían difíciles o imposibles de alcanzar con los métodos tradicionales de aspersión. Esto puede reducir la necesidad de deforestar o alterar hábitats naturales para el cultivo.
Rápida respuesta a problemas	Los drones pueden detectar y responder rápidamente a problemas como infestaciones de plagas o enfermedades, reduciendo la necesidad de aplicaciones preventivas y generalizadas de productos químicos.
Reducción del uso de agua	Muchos drones de aspersión utilizan técnicas de ultra bajo volumen que requieren un 70% - 90% menos agua que los métodos tradicionales de aspersión.
Uso de Agroinsumos de ultra bajo volumen (UBV)	Se reduce la cantidad de agroinsumos, y las filtraciones al subsuelo y se reduce la deriva, lo cual tiene varios beneficios tanto para el medio ambiente como para las plantas.
Reducción de la deriva	La aplicación de productos UBV con drones puede reducir la deriva, lo que minimiza la exposición de las áreas no objetivo a estos productos.
Menor impacto en las poblaciones de insectos benéficos	Con la aplicación precisa y dirigida que ofrecen los drones, se puede minimizar el impacto en las poblaciones de insectos beneficiosos, como las abejas.
Reducción del contacto directo del personal de campo con productos nocivos para la salud	Reduce el riesgo de contraer enfermedades en las vías respiratorias por el contacto directo con productos nocivos para la salud.

Adicionalmente, gracias a los avances tecnológicos ahora es posible realizar trabajos autónomos y nocturnos para la nutrición de las plantas o para el control de plagas lo que implica varios beneficios tanto para el medio ambiente como para la propia planta (Tabla 7).

Tabla 7. Beneficios adicionales (Fuente: Elaboración propia en colaboración y con información de Precisión Agrícola, 2023).

BENEFICIOS POR TRABAJO AUTÓNOMOS Y NOCTURNOS	DESCRIPCIÓN
Menor evaporación	Durante la noche, las temperaturas son más bajas y el sol no está presente, lo que significa que hay menos evaporación. Esto permite que más agua y nutrientes lleguen al suelo y sean absorbidos por las plantas. Esto no solo mejora la eficiencia del uso del agua, sino que también reduce la cantidad de agua necesaria para la irrigación y la aplicación de nutrientes.
Reducción de la deriva de pesticidas	La deriva de pesticidas ocurre cuando los pesticidas son llevados por el viento a áreas no deseadas. Por la noche, los vientos suelen ser más calmados, lo que puede reducir la deriva de pesticidas. Esto ayuda a proteger los ecosistemas cercanos y la fauna no objetivo.
Mayor efectividad en el control de plagas	Algunas plagas son más activas durante la noche, por lo que la aspersión nocturna puede ser más efectiva para su control. Además, al reducir la exposición de los pesticidas a la luz solar, se puede prolongar la vida útil de los pesticidas, ya que algunos pueden degradarse con la luz solar.
Menor estrés para las plantas	La aspersión durante el día, especialmente en días calurosos, puede causar estrés en las plantas debido a la rápida evaporación. La aspersión nocturna puede ayudar a reducir este estrés.
Menor interferencia con las actividades agrícolas	Realizar las aspersiones por la noche puede reducir la interferencia con otras actividades agrícolas que se realizan durante el día.
Mayor eficiencia en la absorción de nutrientes	Algunos nutrientes son mejor absorbidos por las plantas durante la noche, por lo que la aplicación nocturna puede mejorar la eficiencia nutricional.

6. Conclusiones

Los drones son una innovación que forma parte de la Agricultura 4.0, son una herramienta adicional que complementa el portafolio de tecnologías con los que cuenta el agricultor, y como toda innovación está en proceso de adopción, adaptación y de regulación en América Latina (Beltrán Barreto, 2023). El papel transformador de los drones representa una oportunidad para modernizar la agricultura mexicana y enfrentar los desafíos de un mundo cada vez más exigente en términos de producción y cuidado del medio ambiente.

Los drones agrícolas permiten realizar una serie de tareas de precisión inigualable y reducen la necesidad de maquinaria pesada, además, pueden ayudar a minimizar los riesgos ocupacionales en la agricultura, incluyendo la exposición a sustancias químicas (especialmente relevante si se manipulan de manera incorrecta) y las lesiones por operación de maquinaria.

A medida que la tecnología avanza, encontraremos nuevas formas de realizar las operaciones agrícolas de manera más innovadora, segura, eficiente, sencilla y amigable, para todos los actores del sector; los drones agrícolas son indudablemente una realidad accesible en la actualidad, que proporciona las herramientas tecnológicas y el conocimiento necesario para que estos actores puedan mejorar su productividad y eficiencia, lo que a su vez contribuye a la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las comunidades.

Falta mucho por hacer, en términos de inversión, formación y desarrollo de habilidades, principalmente para los pequeños productores que requieren optimizar al máximo sus costos de producción, no obstante, esta tecnología será un factor clave para la adopción de la Agricultura 4.0 y el progreso socioeconómico de nuestro país.

7. Bibliografía

- Agrofy (2023). ¿Cuáles son los drones agrícolas más grandes del mundo? 05/Junio/2023.<https://news.agrofy.com.ar/noticia/205162/cuales-son-drones-agricolas-mas-grandes-mundo>, fecha de acceso 29 de septiembre de 2023.
- Armendáriz Valdez, M. O. (2022). Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia como herramienta transversal en la gestión integral del riesgo.
- Banco Interamericano de Desarrollo (2019). Innovación Agrotech en América Central y el Caribe: Oportunidades y desafíos frente al cambio climático. Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO).

- Beltrán Barreto, G. (2023). Antecedentes, uso y aplicación de drones en Colombia como herramienta estratégica de análisis en la agricultura de precisión. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/5386>
- Cerón, A. F. G. (2020). Tan cerca y tan lejos de la agricultura 4.0 en Colombia. Revista universidad EAFIT, 55(175), 78-85.
- CNA (2023), CONSEJO NACIONAL AGROPECUARIO. NUESTRO CAMPO: El Consejo Nacional Agropecuario y la Evolución Agroalimentaria de México.
- De Clercq, M., Vats, A., & Biel, A. (2018). Agriculture 4.0: The future of farming technology. World Government Summit.
- Deloitte (2018). The role of future technologies in Agriculture, Deloitte, agosto 2018, <https://www.deloitte.com/au/en/Industries/consumer-products/perspectives/role-future-technologies-agriculture.html>, fecha acceso 29 septiembre 2023.
- DJI (2023). Especificaciones Agras T10 <https://www.dji.com/mx/t10/specs>, fecha de acceso 19 de noviembre de 2023.
- DOF (2019). Diario Oficial de la Federación. NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, Que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5578813&fecha=14/11/2019#gsc.tab=0, fecha acceso 29 septiembre 2023.
- Droneearth (2023). Informe del mercado mundial de drones agrícolas 2021-2026: oportunidades en exenciones por parte de la Administración Federal de Aviación de EE. UU. Y aumento de la demanda en los países de APAC. <https://droneearth.co/noticias/informe-del-mercado-mundial-de-drones-agricolas-2021-2026-oportunidades-en-exenciones-por-parte-de-la-administracion-federal-de-aviacion-de-ee-uu-y-aumento-de-la-demanda-en-los-paises-de-apac.html>, fecha acceso 29 septiembre 2023.

- Elizondo Flores, J. A., Montes-Rivera, F. Y., Valdivia-Alcalá, R., & Cruz-Betanzos, A. (2023). Agriculture 4.0: Is Mexico Ready?. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i4.2495>
- FAO (2023). Food and Agriculture Organization of the United Nations. E-Agriculture in action: drones for agriculture. <https://www.fao.org/3/l8494EN/i8494en.pdf>
- Fortune (2023). Fortune Business Insights, Report ID: FBI102589. <https://www.fortunebusinessinsights.com/agriculture-drones-market-102589>
- GOOGLE (2023). Google Académico (2023). Google Scholar <https://scholar.google.com/>
- HSE-UAV (2023). All Drones, XAG, DJI. <https://hse-uav.com/collections/all-drones>, fecha acceso 29 septiembre 2023.
- Lioutas, E., Charatsari, C., La Rocca, G., & De Rosa, M. (2019). Key questions on the use of big data in farming: An activity theory approach. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*.
- Lundström, C., & Lindblom, J. (2016). Considering farmers' situated expertise in using AgriDSS to foster sustainable farming practices in precision agriculture. *The International Society of Precision Agriculture*.
- Milenio (2019). El campo mexicano se moderniza con el uso de drones, 11.11.2019. <https://www.milenio.com/especiales/el-campo-mexicano-se-moderniza-con-el-uso-de-drones>, fecha acceso 29 septiembre 2023.
- Mooney, Pat, and E. T. C. Grupo (2019). "La insostenible agricultura 4.0." Digitalización y poder corporativo en la cadena alimentaria. Ver en < <https://bit.ly/3ep6Rxh>.
- Precisión Agrícola (2023). Precisión Agrícola S.A de C.V. <http://precisionagricola.com/>
- Profesional AGRO (2020). Madrid 5/06/2020 Revolución industrial: el inicio de una nueva agricultura. <https://profesionalagro.com/noticias/revolucion-industrial-revolucion-agricola.html>

- RAE (2023). Definición de dron. <https://dle.rae.es/dron?m=form>
- Restrepo, Iván Alonso Montoya, Dursun Barrios, and Luz Alexandra Montoya Restrepo (2023). "Retos para los agronegocios en el marco de la cuarta revolución industrial: un recorrido sobre los principales hitos de la agricultura." Fondo Editorial Biogénesis (2023).
- Schwab, K. (2016). La cuarta revolución industrial. Debate. Retrieved from: [http://40.70.207.114/documentosV2/La%20cuarta%20revolucion%20industria-I-Klaus%20Schwab%20\(1\).pdf](http://40.70.207.114/documentosV2/La%20cuarta%20revolucion%20industria-I-Klaus%20Schwab%20(1).pdf).
- Soto, Alejandra Rosales Soto Alejandra Rosales, and Ricardo Arechavala Vargas. "Capacidades tecnológicas y competitividad en las empresas exportadoras de berries de Jalisco." Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad 13 (2019): 496-515.
- Tauger, M.B. (2010). Agriculture in World History. Abingdon, Oxon: Routledge
- Tuesta (2019). Tuesta, V., & Albert, J. Sistema mecatrónico automático para intercambio de baterías en una plataforma de aterrizaje para drones de tipo multirotor.
- UMILES (2022). RPAS, UAS y UAV: ¿Qué son y en qué se diferencian?, 19 de octubre 2022. <https://umilesgroup.com/rpas-uas-uav-diferencias/>
- Wandel Marroquín, Marion (2021). "Nuevas tecnologías y agricultura 4.0: Impacto en los recursos humanos de la industria agrícola en Centroamérica."
- Wingtra (2021). DJI Matrice 300 vs. WingtraOne GEN II. <https://wingtra.com/best-drones-for-photogrammetry-wingtraone-comparison/dji-matrice-300-vs-wingtraone/>