

Vehículos aéreos no tripulados y planificación de rutas en la agricultura de precisión: una perspectiva tecnológica en México

Marco Antonio Sanchez-Romero¹, Francisco Beltran-Carbajal^{1,*}, Hugo Yañez-Badillo² e Irvin Lopez-Garcia¹

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Departamento de Energía, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02200, CDMX., al2242800168@uam.ac.mx, fbeltran@uam.ac.mx, ilg@azc.uam.mx.

² TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Departamento de Investigación, Km. 22, Carretera Tenango - La Marquesa Santiago Tilapa, Santiago Tianguistenco, 52650, Méx., hugo_mecatronica@test.edu.mx.

* Autor de Correspondencia: fbeltran@azc.uam.mx

Resumen

A lo largo de la historia la agricultura ha sido clave para el desarrollo y prosperidad de la humanidad, en donde el aumento en la demanda de alimentos, impulsa la mejora continua de técnicas para optimizar el rendimiento y productividad de los cultivos. La agricultura de precisión integra tecnologías avanzadas para incrementar la eficiencia y productividad del sector agrícola. En este artículo se describen distintos usos de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) en la agricultura, comparando las prácticas tradicionales en México con aquéllas que emplean tecnologías especializadas para el mapeo, monitoreo y control del estado de salud de los cultivos. Además, se incorpora una sección técnica en la que se implementa un algoritmo de planificación de trayectorias del tipo RRT (Rapidly-exploring Random Tree) en Python. Esta implementación busca reforzar, desde una perspectiva didáctica, las posibilidades tecnológicas que los VANTs pueden ofrecer en tareas como el transporte de carga ligera o la inspección autónoma en terrenos agrícolas, contribuyendo al avance tecnológico de este importante sector en México.

Palabras clave—Agricultura de Precisión, Algoritmo RRT, Python, VANTs.

Unmanned aerial vehicles and route planning in precision agriculture: a technological perspective in Mexico

Abstract

Throughout history agriculture has been key to the development and prosperity of humanity, where the increasing demand for food continues to drive the continuous improvement of techniques to optimize crop yield. Precision agriculture integrates advanced technologies to increase the efficiency and productivity of the agricultural sector. This article presents the various uses of Uncrewed Arial Vehicles (UAVs) in agriculture, comparing traditional practices in Mexico with those that employ specialized technologies for mapping, monitoring, and controlling crop health conditions. A technical section is additionally included in which a trajectory planning algorithm of the RRT (Rapidly-exploring Random Tree) type is implemented in Python. This implementation aims to reinforce, from a didactic perspective, the technological possibilities that UAVs can offer in tasks such as light cargo transportation or autonomous inspection in agricultural fields, contributing to the technological advancement of this important sector in Mexico.

Keywords— Precision Agriculture, Python, RRT algorithm, UAV.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura ha sido parte de la humanidad desde que las primeras personas dejaron de ser nómadas y comenzaron a ser sedentarios. Desarrollar técnicas de supervivencia era indispensable para perpetuar la especie humana. La agricultura surge de la necesidad de estos grupos, de generar sus propios alimentos.

En la antigua Mesoamérica, a diferencia de algunos grupos contemporáneos a la época, no utilizaron a los animales para realizar tareas agrícolas como el transporte de materiales o ayuda en el campo, sino que el trabajo fue hecho por los mismos pobladores.

El trabajo manual permitió desarrollar un método denominado *irrigación*, ilustrado en la Fig. 1 a), que consiste en tomar agua de ríos o lagos cercanos, y, mediante caminos elaborados por los mismos pobladores, se aseguraban que el

agua llegara a la mayor parte del sembradío [1]. En la Fig. 1 b) se muestra otro método utilizado llamado *aterrazamiento*, en donde se sembraba en lugares altos creando de manera natural un desnivel para que en tiempos de lluvia, el agua escurriera hacia el terreno de interés [2]. A la espera de la lluvia para regar el cultivo se le conoce como *riego de temporal* o *agricultura de secano* [3].

A medida que pasaba el tiempo, fueron mejorando sus técnicas de tratamiento y uso de suelo, domesticando animales para después utilizarlos en tareas de sembradío, recolección y transporte de alimentos [4]. El conocimiento generado durante mucho tiempo por estas primeras civilizaciones, transmitidos de generación en generación, permiten que en la actualidad se cuenten con diversos métodos para el cuidado de los cultivos. Estos métodos permiten identificar plagas, conocer la temperatura, la humedad, el tipo de suelo y el comienzo de la siembra y cosecha adecuado para cada cultivo.



Fig. 1. a) Método de irrigación. b) Método de aterrazamiento. Imagen generada con herramientas de inteligencia artificial.

Toda la información generada a través del tiempo, creó una gran base de datos que se actualiza y mejora continuamente. Esta información ha sido y es de gran importancia para poder utilizar y desarrollar tecnología en el sector agrícola. La

implementación de estas tecnologías en la agricultura, contribuye al desarrollo de la llamada agricultura 4.0. En donde el objetivo es que, a través del manejo e implementación adecuada de toda información, se cumpla con la demanda de calidad y producción [5].

La agricultura 4.0 surge a partir del uso de tecnologías avanzadas que pueden combinarse. En la Fig. 2 se observa, además de la recepción y manejo de distintas fuentes de información, la interconexión entre sensores, drones, operador y maquinaria para la producción eficiente del cultivo.

Algunos puntos clave que integran distintas tecnologías al sector agrícola son: Análisis de datos y Big Data, que consiste en el procesamiento de grandes volúmenes de datos, predecir condiciones climáticas y rendimiento de los cultivos. Finalmente, se planifican estrategias más efectivas, además de software de gestión agrícola, el cual facilita el monitoreo y la gestión de actividades agrícolas desde cualquier lugar [6].



Fig. 2. La importancia de la recopilación, procesamiento y uso adecuado de datos para la producción eficiente del cultivo [6]. Imagen generada utilizando herramientas de inteligencia artificial.

El Internet de las Cosas (IoT) se aplica de forma interesante en la recopilación y aprovechamiento de información sobre los procesos de producción y el uso del suelo. Esto abarca desde la utilización de herramientas digitales para facilitar y automatizar las tareas agrícolas, hasta una mayor calidad de los alimentos mediante la obtención de información detallada sobre el origen de estos [7], [8]. Este tipo de tecnología se sigue desarrollando tanto en México, como en otros países; en donde principalmente se busca que los dispositivos de adquisición de datos envíen los datos de forma instantánea y sin interrupción, disminuyendo tiempos de monitoreo preventivo de los cultivos.

En la agricultura de precisión, así como en la ayuda ante catástrofes, la inspección de edificios o la supervisión del tráfico, se utilizan Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), también conocidos como drones. Esta clase de vehículos robóticos son semiautónomos, debido a que se operan de manera remota mediante un control a distancia.

El dron tiene que volar de acuerdo con la definición de una trayectoria de vuelo en términos de puntos de referencia y altitud de vuelo. Por lo tanto, el dron requiere de un sistema de medición de posicionamiento, por ejemplo, el Sistema Global

de Navegación por Satélite (GNSS) o el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), para conocer su posición con respecto a los puntos de referencia. Además, incorpora un altímetro, por ejemplo, barómetro, altímetro láser, sensor ultrasónico, para volar a altitudes de vuelo constantes [9].

En el presente artículo se describen distintas aplicaciones de los VANTs en el sector agrícola, que consiste en una revisión documental de fuentes recientes realizadas en un contexto nacional y extranjero. Se proporciona un panorama más amplio del desarrollo tecnológico en México, y el trabajo realizado por otros países. También, se destacan los beneficios operativos, económicos y ambientales del uso de VANTs frente a prácticas convencionales.

Finalmente, se presenta de manera ilustrativa un algoritmo de exploración para planificar trayectorias que busca reforzar las posibilidades tecnológicas que los drones pueden ofrecer en tareas como el transporte de carga ligera o la inspección autónoma en terrenos agrícolas. El objetivo de mitigar el rezago que presenta este importante sector y que representa el 1.95 % del producto interno bruto de México [10].

II. TÉCNICAS AGRÍCOLAS

La agricultura es un conjunto de actividades en donde se busca el aprovechamiento del suelo, la fauna, el agua, las condiciones climáticas, etc., para obtener productos destinados al consumo humano, animal o a otros fines productivos. Desde que inició la vida sedentaria, los primeros seres humanos han ido desarrollando diversas técnicas para poder producir alimentos de alta calidad, tratando de ser cada vez más eficientes y eficaces, atendiendo las demandas que día con día van aumentando.

Diversas técnicas que se usan en la agricultura se describen en [11-15]. En [11] se presenta un sistema de captación de agua en Izúcar de Matamoros, derivado de sequías cada vez más prolongadas. En [12] se opta por construir un invernadero para siembra y cosecha de tomate, resaltando la escasa información acerca de los requerimientos de riego, en donde normalmente esta información es empírica. En [13] realizan una técnica llamada *siembra directa* que consiste en hacer surcos con la ayuda de animales no tan profundos para no dañar la capa superficial del suelo y controlar la erosión y degradación del suelo en los cultivos manteniendo su fertilidad y productividad. En [14] utilizan un mecanismo llamado *Strip-Till* acoplado a un vehículo capaz de mover grandes masas. Este mecanismo está equipado con puntas ajustables según lo que se quiera sembrar y se utiliza para preparar la línea de siembra sin la necesidad de utilizar arado, transitando a una agricultura más sostenible que contribuye a reducir en gran medida la erosión del suelo. En [15] se presenta una técnica tradicional para aplicación de agroquímicos, la cual consiste en la contratación de jornaleros, equipados con mochilas de aspersión, cubriendo la superficie a tratar. Este método, además de demandar un mayor esfuerzo físico y tiempo, implica un consumo considerable de agua, estimado entre 600 y 800 litros por hectárea.

Por otro lado, existen tareas que hasta el momento no se podrían efectuar con VANTs, como el arado, nivelación, compactación del terreno, reparación del sistema de riego, requiriendo de personas que realicen estas labores. Así que, el objetivo no es desplazar la mano de obra mexicana, más bien, crear una relación estrecha entre la tecnología y el hombre, con el fin de obtener resultados óptimos para este importante sector.

Emplear VANTs, además de usarse para labores de siembra, cosecha o tratamiento de suelo, realizan tareas de operatividad preventiva. Los drones tienen la capacidad de recopilar información útil al monitorear el cultivo frecuentemente, ayudando al agricultor a tomar decisiones adecuadas de acuerdo con sus objetivos. En comparación con la toma de muestras manuales, que implica menor cobertura espacial y mayor tiempo de espera, ya sea por el envío y dictamen del laboratorio o el uso de dispositivos portátiles.

III. PRINCIPALES VENTAJAS DE UTILIZAR DRONES EN LA AGRICULTURA

Utilizar drones en la agricultura tiene múltiples beneficios que le brindan al agricultor alternativas viables, aumentando la eficiencia de los cultivos. Al estar equipados con cámaras específicas, tienen la capacidad de detectar enfermedades a

temprana edad, prediciendo el rendimiento de sus cultivos y localizando deficiencias de nutrientes.

Abordar el problema de salud de inmediato, y no dejar esparcir la enfermedad en la mayoría del cultivo, tiene como consecuencia una mejora productiva, ahorro de insumos, control del cultivo, productos de alta calidad y que finalmente se ve reflejado en una mayor adquisición económica [16]-[18].

Son diversas las aplicaciones de los drones en la agricultura, ya que pueden realizar tareas de siembra, cosecha y tratamiento de suelo. En cuanto a siembra se utilizan para esparcir las semillas a lo largo del cultivo de interés, cubriendo terrenos de difícil acceso.

Los vehículos robóticos están equipados con cámaras térmicas y multiespectrales permiten analizar las condiciones del cultivo para posteriormente ajustar las estrategias de siembra. En la Fig. 3 se puede observar la implementación de VANTs en tareas de monitoreo e inspección de cultivos que permiten la comunicación en tiempo real entre el dispositivo y el operador. También, las cámaras con las que cuentan los drones contribuyen a realizar labores de cosecha identificando la madurez del cultivo, brindando información precisa para el agricultor.



Fig. 3. Comunicación instantánea entre el VANT y el operador para el análisis de imágenes [16].

Los drones tienen la capacidad de realizar inspecciones preventivas, equipados con cámaras de alta resolución. Existe la cámara Red Green Blue (RGB), utilizadas en detectar zonas secas, plagas visibles o malezas. Los sistemas Light Detection and Ranging (LIDAR) se utilizan habitualmente para generar mapas de elevación o pendiente del terreno [19]. Así como cámaras infrarrojas, que se emplean para conocer el estrés hídrico o enfermedades que alteran la temperatura del cultivo.

IV. CÁMARAS UTILIZADAS EN LA RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Existen distintas cámaras utilizadas para la obtención de información del cultivo según sea el objetivo, ya que permiten visualizar de distintas perspectivas el campo de operación. Existe la cámara RGB Digital, Fig. 4 a): Captura fotografías o videos del espectro visible, que incluye los colores, rojo, verde y azul, con una longitud de onda entre 390 y 700 nanómetros. Cámara Multiespectral, Fig. 4 b): captura imágenes de longitudes de onda del espectro visible RGB y de uno o más segmentos del espectro infrarrojo, mayores a 700 nanómetros. Cámara Hiperespectral, Fig. 4 c): Recopila imágenes de una gran cantidad, normalmente más de 50 bandas espectrales estrechas en un rango continuo, generalmente entre 300 y 2200 nanómetros. Cámara LIDAR, Fig. 4 d): Utiliza pulsos láser para mapear elevaciones de superficies con un nivel de precisión

muy alto. Por último, en la Fig. 4 e) se aprecia una imagen obtenida con una cámara térmica, que captura imágenes

térmicas o videos en el rango infrarrojo largo, aproximadamente de 7000 a 12 000 nanómetros [20].

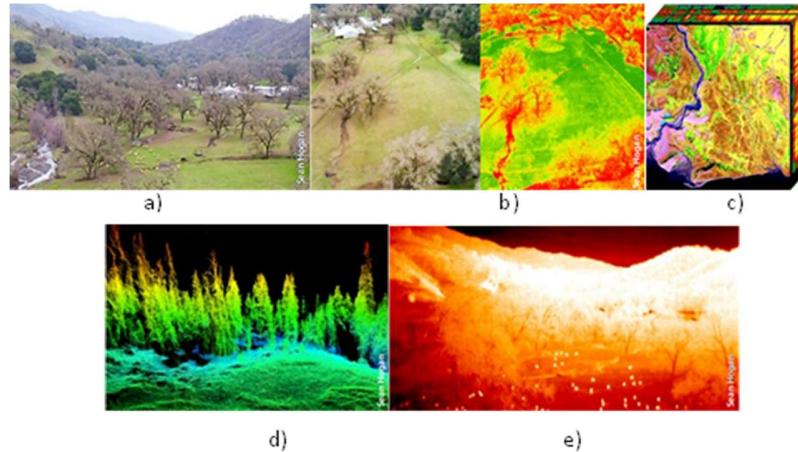


Fig. 4. a) Cámara RGB Digital. b) Cámara multiespectral. c) Cámara hiperespectral. d) Cámara LIDAR. e) Cámara térmica [22].

V. GENERACIÓN DE RUTAS ÓPTIMAS USANDO UN ALGORITMO RRT

Esta sección se presenta una técnica para generar trayectorias planificadas a través de un algoritmo de exploración, como caso ilustrativo. El cual busca exponer una excelente área de oportunidad para el desarrollo tecnológico de VANTs en México.

Un algoritmo RRT por sus siglas en inglés (Rapidly-exploring Random Tree), es un algoritmo de exploración, partiendo de un punto inicial a un punto final, en este proceso va creando ramificaciones [21], como se observa en la Fig. 5, semejantes a las raíces de los árboles.

Existen distintos tipos de exploración que se ajustan a las necesidades de cada caso. Están por ejemplo el RRT básico, que es el que se muestra en la Fig. 5, el RRT adaptativo, el cual ajusta su radio de exploración en tiempo real debido a obstáculos o cambios climáticos. RRT con múltiples objetivos, permite pasar por varios puntos intermedios antes de llegar al punto final [22], [23]. Emplear algoritmos RRT en la agricultura tiene distintos beneficios, pues permite planificar rutas óptimas.

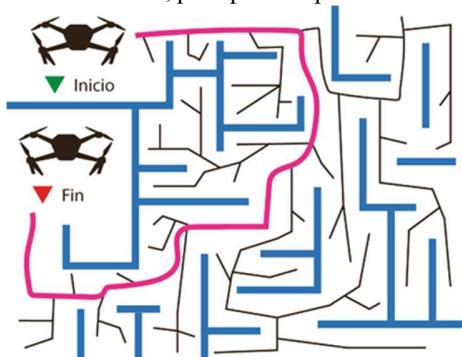


Fig. 5. Algoritmo RRT utilizado para generar rutas óptimas.

Las aplicaciones de estos algoritmos son diversas, pues van desde la medicina, hasta la robótica [24]. En la Fig. 6 a), se

observa la asistencia quirúrgica utilizando un brazo robótico, en el cual se planifica la trayectoria del brazo mediante algoritmos RRT [25]. Del mismo modo se utilizan para la gestión del tráfico aéreo en la planificación de rutas y evitar colisiones entre aeronaves, ilustrado en la Fig. 6 b) [26].

La aplicación en vehículos autónomos está en crecimiento, utilizadas en conducción autónoma para planificar las trayectorias entre las calles considerando los obstáculos que se llegaran a presentar, esta aplicación se visualiza en la Fig. 6 c) [27]. Finalmente, en la Fig. 6 d) se observa la planificación de trayectorias de los personajes en los videojuegos, estos algoritmos también se utilizan para que los personajes autónomos no colisionen entre sí, y reaccionen al entorno de manera coherente [28].

En la agricultura, desarrollar este tipo de algoritmos es interesante, ya que permite trazar una ruta de un punto a otro. Redireccionando, si así se requiere según sea el terreno, para evitar obstáculos; generando rutas confiables. Existen escasos estudios elaborados en México acerca de la implementación de estos algoritmos en la agricultura, lo cual representa una importante área de oportunidad [29].

Es importante mencionar que desarrollar estos algoritmos tiene como objetivo disminuir de manera significativa los gastos económicos. Obtener rutas cortas permite que tareas de mapeo georeferenciado, monitoreo e inspección se realicen en menor tiempo. Además, se prevé que desarrollar este tipo de algoritmos permita utilizar de manera eficiente el suministro de energía eléctrica en las baterías [30], [31].

En la Fig. 7 se muestra de manera exitosa un algoritmo RRT programado en Python, ya que permite reconocer la zona en color negro como obstáculos y la zona en color blanco como naveables. Uniendo el punto inicial con el punto final, trazando una ruta resaltada por los círculos en color rojo. Se tomaron los datos del INEGI para extraer la geometría, misma que corresponde al estado de Guanajuato [32].

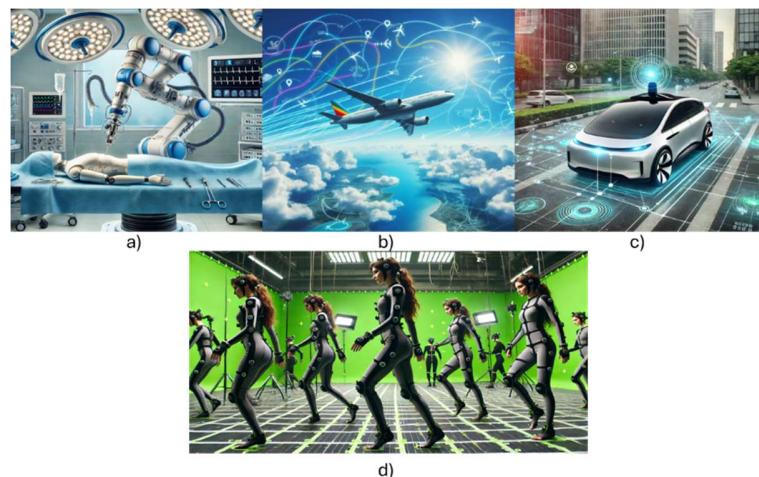


Fig. 6. a) Asistencia quirúrgica utilizando un brazo robótico. b) Control del tráfico aéreo. c) Planificación de trayectorias en vehículos autónomos. d) Planificación del movimiento de personajes en videojuegos. Imagen generada con herramientas de inteligencia artificial.

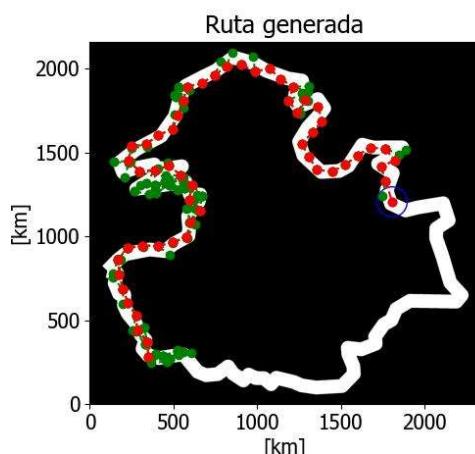


Fig. 7. Evaluación exitosa del algoritmo RRT programado en Python.

Lo que se busca principalmente es obtener el contorno para posteriormente cargarla al programa en Python y así delimitar la zona de operación en donde el vehículo pueda navegar. Como se mencionó anteriormente, generar rutas a partir de una imagen, tiene múltiples aplicaciones en el campo agrícola. Se decidió hacerlo en este software porque es de acceso libre, impulsando a todo aquél que esté interesado en la investigación y programación, a hacerlo con las menores restricciones posibles.

VI. CONCLUSIÓN

En este artículo se expusieron las ventajas que tiene implementar VANTs en la agricultura de precisión en México, aprovechando el desarrollo tecnológico que está sucediendo en la actualidad, con el uso de tecnologías altamente avanzadas enfocándose un sector al cual se le pone poca atención.

El uso de tecnologías brinda alternativas eficientes a los agricultores, detectando enfermedades a tiempo, disminuyendo pérdidas en los cultivos. Controlando mediante monitoreos constantes sus tierras sin importar la accesibilidad para llegar a sus huertos.

Es importante mencionar que incorporar este tipo de tecnologías no busca desplazar la mano de obra mexicana, sino crear un equipo sólido en pro de la eficiencia productiva.

Finalmente, se presentó el funcionamiento de un algoritmo RRT programado en Python el cual se busca seguir desarrollando, y, en conjunto con tecnologías emergentes como aprendizaje automático, se pueden obtener rutas más cortas, que abarquen una mayor área para disminuir de manera considerable los gastos operativos y aumentar la eficiencia productiva.

El estudio de este tipo de mecanismos es altamente complejo, pero es una apuesta que distintos investigadores y agricultores mexicanos están tomando. En estados como Sinaloa, Guanajuato, Michoacán, Hidalgo, Zacatecas, ya se comienzan a utilizar este tipo de dispositivos y en este sentido se sigue desarrollando la tecnología necesaria para que llegue a más estados de la República Mexicana a menor costo.

El sector agrícola desempeña un papel fundamental en la economía mexicana, por lo que es imprescindible reconocer su importancia y fomentar su desarrollo.

VII. REFERENCIAS

- [1] Arqueología Mexicana. (2023). Técnicas, métodos y estrategias agrícolas. Arqueología Mexicana. Consultado el 20 de agosto de 2024. <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/tecnicas-metodos-y-estrategias-agricolas>.
- [2] México Histórico. (s.f.). Las técnicas tradicionales de cultivo en México. México Histórico. Consultado el 20 de agosto de 2024. <https://www.mexicohistórico.com/páginas/Las-técnicas-tradicionales-de-cultivo-en-Méjico.html>.
- [3] Blogger. (2013). Medidas de conservación de suelos. Agroecología con Yarugyver. Consultado el 10 de septiembre de 2024. <https://agroecologíaconyarugyver.blogspot.com/2013/06/medidas-de-conservacion-de-suelos.html>.
- [4] Rojas, T. (2001). La agricultura y el riego en Mesoamérica. Planeta DeAgostini: México.
- [5] J. A. Elizondo-Flores, F. Y. Montes-Rivera, R. Valdivia-Alcalá, and A. Cruz-Betanzos, "Agriculture 4.0: Is Mexico Ready?," *Agro Productividad*, vol. 16, no. 4, pp. 91–106, Apr. 2023.
- [6] EURACTIV. (2016). Farming 4.0: The future of agriculture. Consultado el 20 de septiembre de 2024. <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/infographic/farming-4-0-the-future-of-agriculture/>.

- [7] 365FarmNet. (2017). Agriculture 4.0 – Ensuring connectivity of agricultural equipment: Challenges and technical solutions for the digital landscape in established farms with mixed or analogue equipment. Berlin, Germany. Consultado el 20 de septiembre de 2024. https://mmt/data/Whitepaper_Agriculture4.0_January2017.pdf.
- [8] EURACTIV. (2017). Commission: Technology will make farming more transparent to consumers. Consultado el 20 de septiembre de 2024. <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/news/commission-technology-will-make-farming-more-transparent-to-consumers/>.
- [9] Nesta. (2015). Precision agriculture: Almost 20% increase in income possible from smart farming. Consultado el 20 de septiembre de 2024. <https://www.nesta.org.uk/blog/precision-agriculture-almost-20-increase-in-income-possible-from-smart-farming/>.
- [10] Daponte, P., De Vito, L., Glielmo, L., Iannelli, L., Liuzza, D., Picariello, F., & Silano, G.. A review on the use of drones for precision agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 275, pp. 12-22, May. 2019.
- [11] Secretaría de Economía. (2024). Agriculture, animal production, forestry, fishing and hunting. México. Consultado el 14 de octubre de 2024. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/agricultura-e-animal-production-forestry-fishing-and-hunting>.
- [12] Rojas, L. (2018). Factibilidad técnica: sistemas de captación de agua de lluvia para parcelas agrícolas. Consultado el 14 de octubre de 2024. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/7497>.
- [13] Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, vol. 25, pp. 127-134. Apr. 2017
- [14] BASF. (2024). Siembra directa. BASF Agricultura. Consultado el 14 de octubre de 2024. <https://agriculture.bASF.com/bASF/agriculture/co/es/contenidos-de-agricultura/siembra-directa--un-metodo-productivo-y-sostenible>.
- [15] CIAD. (s.f.). Faro Agroecológico Hidalgo: Transformando la agricultura mediante prácticas agrícolas sostenibles. CIAD Faros Agroecológicos. Consultado el 20 de diciembre de 2024. <https://farosagroecologicos.ciad.mx/faro-agroecologico-hidalgo-transformando-la-agricultura-mediente-practicas-agricolas-sostenibles/>.
- [16] Bien, A. (2021, noviembre). ¿Cuál es mejor? Fumigación por trabajador vs fumigación con drone [Video]. YouTube. Consultado el 20 de diciembre de 2024 <https://www.youtube.com/watch?v=0zWb3Fc4esA&t=153s>.
- [17] Arza, G. M., & Burgess, A. J. Drones in the Sky: Towards a More Sustainable Agriculture. *Agriculture*, vol 13, pp. 84-87, Dec. 2022.
- [18] Gupta, Y., Mudgil, P., Sharma, V., & Hussain, Z. Drones: The smart technology in modern agriculture. En Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communication (ICICC), 2022.
- [19] Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannis, P. G. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*, vol. 349, pp. 1-4, Nov. 2019.
- [20] Liu, C., Ding, Y., Zhang, H., Xiu, J., & Kuang, H. Improving Target Geolocation Accuracy with Multi-View Images in Long-Range Oblique Photography. *Drones*, vol. 177, pp. 1-18, Apr. 2024.
- [21] Hogan, S., Kelly, M., Stark, B., & Chen, Y. Unmanned aerial systems for agriculture and natural resources. *California Agriculture*, vol. 1, pp. 5-14, Mar. 2017.
- [22] LaValle, S. M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. *The Annual Research Report*, 1998.
- [23] LaValle, S. M., & Kuffner, J. J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. En *Algorithmic and Computational Robotics: New Directions*, vol. 5, pp. 293-308, 2001.
- [24] Zhang, J., Wang, X., Xu, L., & Zhang, X. An occupancy information grid model for path planning of intelligent robots. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 4, pp. 1-22, Mar. 2022.
- [25] Meng, Q., Chen, K., & Qu, Q. PPSwarm: Multi-UAV Path Planning Based on Hybrid PSO in Complex Scenarios. *Drones*, vol. 5, pp. 1-24, May. 2024.
- [26] A. H. T. Lee, J. Zhang, and M. Esfahani, "Neural Tract Avoidance Path-Planning Optimization for Robotic Neurosurgery," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 9, pp. 3687, May 2024.
- [27] A. Fernández-Gutiérrez, P. D. Arambel, and R. S. Larsson, "RRT and Velocity Obstacles-Based Motion Planning for UAS Traffic Management," *arXiv preprint, arXiv:2302.14543*, Feb. 2023.
- [28] Ramírez-Robles, É., Starostenko, O., & Alarcón-Aquino, V. "Real-time path planning for autonomous vehicle off-road driving." *Drones*, vol. 8, no. 7, pp. 288, Jul. 2024.
- [29] S. Yu, M. Chen, and K. Zhang, "An Overview and Comparison of Traditional Motion Planning Based on Rapidly Exploring Random Trees," *Sensors*, vol. 25, no. 7, pp. 2067, Apr. 2025.
- [30] S. A. Albahli, A. A. Khurshid, M. O. Mahfooz, and A. A. Alqahtani, "Adaptive Path Planning for Fusing Rapidly Exploring Random Trees and Deep Reinforcement Learning in an Agriculture Dynamic Environment UAVs," *Agriculture*, vol. 13, no. 2, pp. 354, Feb. 2023.
- [31] H. Fu, Z. Li, and X. Zhou, "Potential-Field-RRT: A Path-Planning Algorithm for UAV's Based on Potential-Field-Oriented Greedy Strategy," *Drones*, vol. 7, no. 5, pp. 331, May 2023.
- [32] Y. Tang, J. Li, Y. Wang, and H. Qian, "HPO-RRT: A Sampling-Based Algorithm for UAV Real-Time Path Planning in a Dynamic Environment," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 9, pp. 2335–2351, Mar. 2023.
- [33] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s.f.). Topografía. INEGI. Consultado el 20 de diciembre de 2024. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/#descargas>.