

AGRICULTURA 4.0 EN ANACARDO: BARRERAS Y ESTRATEGIAS DE ADOPCIÓN

AGRICULTURE 4.0 IN CASHEW: BARRIERS AND ADOPTION STRATEGIES

Jhony Fernando López Torres¹, William Pérez Cotrino²

Resumen: El anacardo (*Anacardium occidentale* L.) es un cultivo tropical estratégico cuya productividad se ve afectada por plagas y enfermedades. Las tecnologías de Agricultura 4.0, como inteligencia artificial, drones y sensores, ofrecen alto potencial para el manejo fitosanitario de precisión; sin embargo, su implementación en agroecosistemas tropicales enfrenta barreras socio-técnicas. Mediante un análisis de literatura y un estudio de caso en Vichada, Colombia, se validó la eficacia de estas herramientas, destacando ventajas como el monitoreo temprano y la aplicación localizada de insumos. No obstante, se identificaron limitantes claves: escasez de datos locales, altos costos y falta de capacitación. El estudio concluye que el futuro de la agricultura inteligente en anacardo requiere integrar innovación tecnológica con modelos de negocio inclusivos, (ej. MaaS), y consorcios de datos público-privados. Se propone una hoja de ruta para alinear el potencial de la Agricultura 4.0 con las condiciones socioeconómicas y ambientales del campo.

Palabras clave: Anacardo, agricultura 4.0, control de plagas, inteligencia artificial, adopción de tecnología, barreras socio-técnicas.

¹ Co-founder & CEO at Neptura | Suan Blockchain

² Consultor de la asociación de emprendedores de Colombia (ASEC)

Abstract: Cashew (*Anacardium occidentale* L.) is a key tropical crop whose productivity is threatened by pests and diseases. Although Agriculture 4.0 technologies offer enormous technical potential for precision management, this article argues that their real viability in complex tropical agroecosystems critically depends on overcoming socio-technical barriers that the literature often underestimates. Through a literature analysis and a practical case study in Vichada, Colombia, the operational potential of these tools is validated, but the scarcity of local data, high costs, and lack of training are identified as the main bottlenecks. It is concluded that the future of smart agriculture in cashew requires an integrated approach that combines technological innovation with inclusive business models (e.g., Machinery-as-a-Service) and data consortia. This work proposes a roadmap to align technological potential with field reality.

Keywords: Cashew, agriculture 4.0, pest control, artificial intelligence, technology adoption, socio-technical barriers.

1. Introducción

El anacardo (*Anacardium occidentale* L.) es un cultivo tropical de alto valor comercial, ampliamente cultivado por su importancia económica en países de África, Asia y América Latina. En naciones como India, Vietnam y Brasil, el anacardo no solo representa una importante fuente de ingresos por exportación, sino que también sustenta los medios de vida de millones de pequeños agricultores [1,2]. La creciente demanda global de nueces y productos derivados ha consolidado su posición estratégica en la agricultura tropical.

En Colombia, el cultivo ha ganado relevancia en regiones como el departamento del Vichada, donde se ha priorizado como una de las principales apuestas productivas. Según datos técnicos regionales, existen más de 4000 ha establecidas, con proyecciones de expansión hacia un modelo agroindustrial orientado a la exportación, fundamentado en las ventajas edafoclimáticas de la región y su potencial para el desarrollo rural sostenible [3].

La productividad del anacardo es constantemente amenazada por un complejo de plagas y enfermedades que pueden causar pérdidas de rendimiento superiores al 30 % si no se manejan adecuadamente. Entre las plagas más devastadoras a nivel mundial se encuentra el mosquito del te (*Helopeltis* spp.), que ataca brotes tiernos y frutos, y el barrenador del tallo y la raíz (*Plocaederus ferrugineus*), cuyas larvas pueden matar árboles adultos. En el ámbito de las enfermedades, la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) y la gomosis del tallo (*Lasiodiplodia theobromae*) comprometen la estructura y longevidad de la plantación. Este conjunto de amenazas constituye el principal factor limitante para la producción sostenible, haciendo imperativa la búsqueda de soluciones de manejo más eficientes y precisas [4–6].

Ante este escenario, se vuelve imperativo adoptar estrategias innovadoras que reduzcan la dependencia de pesticidas sintéticos. Las tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA) y los sistemas aéreos no tripulados (UAV) ofrecen herramientas prometedoras para la detección temprana y la aplicación localizada de tratamientos [7]. Estas se complementan con enfoques biológicos y el uso de compuestos bioactivos como el líquido de cascara de anacardo (CNSL) [2, 8].

Frente a este panorama, este artículo va más allá de un simple análisis del estado del arte. Se argumenta que, si bien las tecnologías de agricultura 4.0 ofrecen un potencial técnico sin precedentes, su verdadera viabilidad en agroecosistemas tropicales complejos, como el del Vichada, dependen críticamente de superar barreras socio-técnicas que la literatura científica a menudo subestima. A través de un análisis crítico de la literatura y la evidencia de un caso de estudio práctico, este artículo busca no solo documentar el potencial de estas herramientas, sino también delinear una hoja de ruta realista para su implementación efectiva.

Este documento se organiza de la siguiente manera: la sección de Metodología describe el enfoque de la investigación. A continuación, se presenta el Estado del arte y los enfoques tecnológicos. Posteriormente, la sección del Caso de estudio detalla la aplicación práctica en

Vichada. La Discusión analiza las barreras y estrategias, para finalmente presentar las conclusiones del trabajo.

2. Metodología

Este artículo adopta un enfoque de investigación mixto. Primero, se realiza un análisis crítico de la literatura para establecer el estado del arte. La búsqueda se centró en publicaciones revisadas por pares entre 2020 y 2025 en bases de datos como Scopus y Google Scholar, utilizando cadenas de búsqueda como: (“cashew” OR “Anacardium”) AND (“pest management”) AND (“AI” OR “drone”). Se aplicaron criterios de inclusión (estudios enfocados en anacardo o cultivos perennes tropicales, artículos que evaluaran IA o drones) y exclusión (actas de congreso, literatura gris). Se priorizaron estudios que presentaban resultados cuantitativos o marcos conceptuales sobre la implementación.

Segundo, se presenta un estudio de caso empírico de la “Hacienda Los Amores” (Vichada, Colombia) durante la campaña de 2025. Los datos de monitoreo (Figura 1) se generaron con un dron de ala fija (sensor MicaSense RedEdge-P) y los datos operativos (Tablas 1 y 2) se extrajeron de los registros de vuelo de un dron de aspersión DJI Agras.

3. Estado del Arte y Enfoques Tecnológicos

3.1 Inteligencia artificial aplicada al control de plagas

La inteligencia artificial (IA) ha emergido como una herramienta transformadora en la agricultura de precisión, permitiendo detectar, monitorear y predecir infestaciones de plagas con una eficiencia sin precedentes [9, 10]. Lejos de ser una tecnología monolítica, la IA engloba un conjunto de modelos y algoritmos, cada uno adaptado a diferentes tipos de datos y problemas.

Entre los enfoques más exitosos se encuentran las Redes Neuronales Convolucionales (CNN), que han revolucionado el análisis de imágenes. El poder de las CNN radica en su capacidad para aprender patrones visuales complejos directamente de las imágenes, de forma similar a como lo

hace el ojo humano, identificando primero bordes y texturas para luego reconocer formas como la de un insecto o la mancha de una enfermedad [11, 12]. Sin embargo, la eficacia de estos modelos enfrenta una limitación crítica que es central en nuestra tesis: su dependencia de grandes volúmenes de datos de alta calidad y específicos del contexto. Este problema, conocido en la literatura como “domain shift”, puede ilustrarse de forma sencilla: un modelo de IA entrenado para reconocer una enfermedad en las condiciones de luz y en las variedades de anacardo de la India, probable mente fallara al ser usado en Colombia, donde las condiciones ambientales y genéticas son distintas. Por tanto, la escasez de repositorios de imágenes locales para el Vichada es una de las barreras más significativas, pues sin estos datos, los algoritmos carecen del alimento necesario para aprender y generalizar de manera fiable.

3.2 Sensores remotos y Visión por Computadora

Paralelamente a los avances en IA, las tecnologías de teledetección se han consolidado como los ojos de la agricultura de precisión. La integración de distintos tipos de sensores en plataformas aéreas permite capturar datos que son invisibles al ojo humano, facilitando un diagnóstico temprano del estado del cultivo [13, 14]. Las imágenes hiperespectrales (HSI), por ejemplo, revelan cambios bioquímicos en las plantas asociados a estrés, mientras que las imágenes térmicas detectan variaciones de temperatura indicativas de estrés hídrico o infecciones. Las imágenes RGB de alta resolución, más accesibles, siguen siendo fundamentales para el análisis visual de síntomas.

La verdadera revolución ocurre al combinar estos datos con algoritmos de IA. Modelos como MobileNetV2 y YOLOv5 han demostrado una alta precisión en la clasificación de enfermedades foliares del anacardo, como la antracnosis, y en la cuantificación de la severidad de infestaciones por plagas como el Tea Mosquito Bug [15]. Si bien estas métricas de precisión son impresionantes en condiciones de laboratorio, su transferibilidad directa a la variabilidad lumínica y foliar del campo sigue siendo un desafío clave. Esta sinergia entre sensores y IA, a

menudo procesada mediante computación perimetral (edge computing) para reducir la latencia, permite generar mapas de riesgo detallados que guían las intervenciones en campo de manera precisa y oportuna [16, 17].

3.3. Drones en agricultura inteligente

Los sistemas aéreos no tripulados (UAV) o drones son la plataforma que materializa la agricultura de precisión en el campo. Su versatilidad los ha convertido en herramientas multifuncionales indispensables [18, 19]. Existen principalmente dos categorías funcionales: los drones de monitoreo, equipados con los sensores descritos anteriormente para cartografiar la salud del cultivo, y los drones de pulverización, que ejecutan las prescripciones aplicando insumos de manera localizada y eficiente [20–22].

La integración de ambas capacidades cierra el ciclo de la agricultura de precisión: un dron de monitoreo detecta un foco de bajo vigor y un segundo dron de aspersión aplica un tratamiento específico únicamente en esa área. Este flujo de trabajo no solo optimiza el control de plagas, sino que también se extiende a otras labores como el riego de precisión, donde los datos de humedad del suelo capturados desde el aire pueden automatizar sistemas de riego en tierra [23,24]. Aunque persisten desafíos como la autonomía de las baterías y los marcos regulatorios, la capacidad del dron para operar rápidamente y con un impacto mínimo en el suelo lo posiciona como la herramienta clave para la implementación de un manejo agrícola inteligente y sostenible.

4. Caso de estudio: Agricultura de precisión en el cultivo de anacardo en Vichada

Para ilustrar la aplicabilidad y el impacto de las tecnologías descritas, en esta sección se presenta un caso de estudio desarrollado en la “Hacienda Los Amores”, un establecimiento productivo de anacardo ubicado en el departamento del Vichada, Colombia. Este caso documenta la implementación de un flujo de trabajo de agricultura de precisión que integra el monitoreo aéreo y la aplicación dirigida, contrastando su eficacia con los métodos convencionales.

4.1. Monitoreo multiespectral de la inspección subjetiva al diagnóstico cuantitativo

Tradicionalmente, el monitoreo fitosanitario en plantaciones extensivas se basa en inspecciones visuales a pie o en vehículo. Este método es lento, costoso en mano de obra y altamente subjetivo, lo que a menudo resulta en la detección tardía de problemas cuando ya se han extendido. Además, no genera datos cuantitativos que permitan un seguimiento histórico preciso.

En contraste, la implementación de un dron de ala fija equipado con un sensor multiespectral MicaSense RedEdge-P permitió superar estas limitaciones. Mediante la captura de imágenes en bandas no visibles (NIR y red edge), se generaron mapas de NDVI que revelan el vigor real de la plantación a gran escala (ver Figura 1). Este enfoque permite detectar focos de estrés semanas antes de que los síntomas sean visibles para el ojo humano.

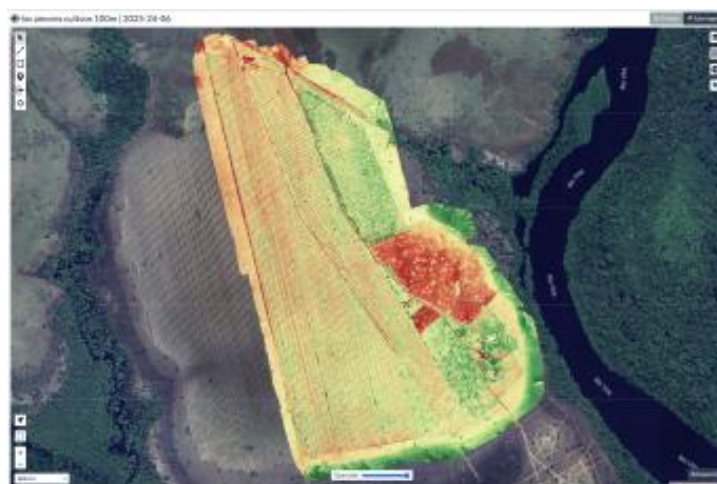


Figura 1. Mapa NDVI de una sección del cultivo de anacardo.

Fuente: elaboración propia

A diferencia de una inspección visual, este mapa cuantifica la variabilidad y permite identificar con precisión milimétrica las áreas de bajo vigor (rojo/amarillo) que requieren intervención.

El resultado es un cambio de paradigma: de un manejo reactivo y generalizado a uno proactivo y localizado. Los mapas de vigor no solo identifican problemas, sino que se convierten en la base para la Aplicación de Tasa Variable (VRA), asegurando que los insumos se apliquen solo donde y cuando son necesarios, un nivel de precisión inalcanzable con el monitoreo tradicional.

4.2. Eficiencia operativa: superando las barreras del terreno y la logística

La aplicación de insumos con métodos terrestres, como fumigadoras de espalda o equipos acoplados a tractor, enfrenta serios desafíos en la Orinoquía. Estos métodos son lentos, generan una alta compactación del suelo que da la estructura radicular, y su operatividad se ve severamente limitada por las condiciones del terreno, especialmente durante la temporada de lluvias.

La adopción de drones de aspersión de 8 litros representó un salto cualitativo en la eficiencia y la logística. El análisis de más de 200 ha aplicadas demostró una capacidad de cobertura sostenida de hasta 30 ha por día con un solo equipo. Esta métrica no solo es superior en velocidad a los métodos terrestres, sino que elimina por completo la compactación del suelo y el daño mecánico a las plantas.

Además, la versatilidad del dron permite operar independientemente de la humedad del suelo, garantizando que las aplicaciones se realicen en la ventana de tiempo agronómica ideal. Esta capacidad de respuesta rápida, guiada por los datos del monitoreo multiespectral, cierra el ciclo de la agricultura de precisión y demuestra un modelo operativo más ágil, sostenible y adaptado a los desafíos de la agricultura tropical a gran escala.

El análisis detallado de los registros de vuelo (N=47) permite cuantificar la eficiencia del sistema. La Tabla 1 resume las métricas operativas promedio, mostrando un rendimiento consistente y predecible. En promedio, cada vuelo cubrió 0,67 ha en poco más de 7 minutos, con un consumo de batería optimizado de aproximadamente 42 puntos porcentuales.

Métrica	Valor Promedio
Área cubierta por vuelo (ha)	0,67
Duración del vuelo (min)	7,15
Consumo de batería (%)	42,1
Volumen aplicado por vuelo (L)	7,21

Tabla 1. Métricas operativas promedio por vuelo de aspersión con dron.
Fuente: elaboración propia.

Para evaluar la capacidad máxima del sistema, se agregaron las áreas aplicadas por día. Como se detalla en la Tabla 2, el equipo de operación alcanzó un pico de rendimiento el 23 de julio de 2025, logrando aplicar sobre 30,9 ha en una sola jornada laboral. Este dato empírico no solo valida la viabilidad del uso de drones para aplicaciones a gran escala, sino que establece un punto de referencia de rendimiento operativo para el cultivo de anacardo en la región.

Fecha	Área Total Aplicada (ha)
2025-07-23	30,9
2025-07-24	25,4
2025-07-22	22,8
2025-08-01	21,9

Tabla 2. Rendimiento operativo diario (días con mayor cobertura).
Fuente: elaboración propia.

Estos resultados demuestran que, más allá de los beneficios agronómicos, la adopción de drones de aspersión representa un modelo logístico superior, capaz de responder con agilidad y alta productividad a las necesidades fitosanitarias del cultivo. Es crucial contextualizar estos resultados de rendimiento para valorar su verdadero impacto. La capacidad operativa demostrada, con picos de 30,9 ha por día (aproximadamente 3,86 ha/hora), posiciona al anacardo en la altillanura colombiana como un cultivo altamente compatible con la agricultura de

precisión. Estos valores son muy competitivos y se alinean con los benchmarks reportados en otros cultivos perennes tropicales, como el café, donde se han medido eficiencias de hasta 4 ha por hora [25]. Si bien el rendimiento es inferior a las tasas máximas observadas en plantaciones de palma de aceite a gran escala, que pueden superar las 10 ha/hora con equipos especializados [26], la comparación sigue siendo muy favorable. Sugiere que la combinación de la arquitectura del árbol de anacardo y la topografía relativamente plana del Vichada crea un escenario ideal para maximizar la eficiencia logística de los UAV, validando su viabilidad económica y escalabilidad en este sistema productivo.

5. Discusión: Barreras, Estrategias e Implicaciones

5.1. Barreras para la adopción a escala

La transición de pruebas de concepto a una adopción generalizada enfrenta barreras complejas. La principal barrera técnica es la escasez de datos locales [27]. A esto se suma la brecha de adopción tecnológica, un fenómeno ampliamente documentado en la literatura, donde el alto costo inicial, la falta de conectividad y la necesidad de capacitación representan obstáculos significativos para pequeños y medianos productores [19]. El alto rendimiento operativo observado en nuestro caso de estudio (30,9 ha/día) subraya esta tensión: la tecnología es funcional, pero su éxito práctico está intrínsecamente ligado a las barreras socioeconómicas discutidas.

5.2. Estrategias y limitaciones del estudio

Para superar estas barreras, se proponen tres estrategias clave: 1) la creación de consorcios de datos público-privados; 2) el desarrollo de modelos de negocio inclusivos como la “Maquinaria como Servicio” (MaaS); y 3) la modernización de la extensión agrícola hacia un modelo 4.0.

Es imperativo reconocer las limitaciones de este estudio. El análisis se basa en un único estudio de caso en una plantación a gran escala y con acceso a capital. Por lo tanto, la generalización de

los hallazgos a pequeños productores debe hacerse con extrema cautela. A pesar de ello, las implicaciones son significativas: para las políticas públicas, los subsidios a equipos son insuficientes sin inversión en infraestructura y capacitación. Para la práctica agrícola, se resalta que la adopción de estas tecnologías es un cambio en el modelo de gestión.

6. Conclusiones

Este artículo confirma la tesis de que la viabilidad de la agricultura 4.0 en el anacardo trasciende el potencial tecnológico y se define por la capacidad de superar barreras socio-técnicas. La evidencia es clara: si bien el potencial técnico es innegable, validado en nuestro caso de estudio con coberturas de hasta 30,9 ha por día, los verdaderos cuellos de botella son la escasez de datos, los altos costos y los desafíos de capacitación. La conclusión fundamental es que el futuro de la agricultura inteligente en el anacardo no depende de inventar tecnologías más potentes, sino de construir los puentes para que las existentes sean accesibles, adaptables y apropiadas para el contexto local. Para ello, se propone una hoja de ruta centrada en consorcios de datos, modelos de negocio inclusivos y una extensión agrícola 4.0.

La hoja de ruta propuesta debe ser respaldada por futuras líneas de investigación (sintetizadas en la Tabla 3). Estas deben priorizar un enfoque multidisciplinario: desde el desarrollo de hardware más accesible (sensores compactos) y software más robusto (modelos de IA sobre datasets locales), hasta el análisis de modelos de negocio innovadores y el impacto agroecológico a largo plazo, para así garantizar una transición sostenible y equitativa.

Líneas de Investigación Futura

Como síntesis, la Tabla 3 presenta una visión estructurada de las principales líneas de investigación emergentes que se derivan de este análisis, sirviendo como guía para futuros trabajos que busquen catalizar esta transformación.

Área de investigación	Descripción
Sensores hiperspectrales compactos Modelos de IA robustos y explicables	Desarrollo de sensores ligeros, económicos y adaptados al uso de drones para monitoreo en tiempo real del cultivo. Creación de algoritmos de aprendizaje profundo capaces de adaptarse a diferentes entornos y condiciones del anacardo, con interpretabilidad integrada.
Bases de datos específicas del anacardo Microdrones y enjambres corporativos Integración IA-UAV-CNSL	Generación de conjuntos de imágenes multiespectrales y térmicas anotadas, provenientes de condiciones reales de campo. Exploración de UAVs especializados para tareas coordinadas de monitoreo y aplicación localizada de tratamientos. Investigación de sistemas híbridos que combinen monitoreo inteligente con el uso sostenible del líquido de cáscara de anacardo como biopesticida.
Sistema de apoyo a decisión agrícolas Evaluación costo-beneficio en pequeños productores Armonización normativa para AUV Impacto agroecológico a largo plazo	Desarrollo de plataformas digitales que integran predicciones de IA, condiciones climáticas y manejo agronómico. Análisis económico-social sobre adopción de tecnologías de precisión en fincas de baja escala Propuesta de políticas que permitan operar vuelos agrícolas más allá de la línea visual (BVLOS) en zonas rurales Evaluación de los efectos ambientales del uso intensivo de tecnologías inteligentes en los ecosistemas del anacardo.

Tabla 3. Líneas de investigación futura para el manejo inteligente de plagas en el cultivo de anacardo.
Fuente: elaboración propia.

Limitaciones del estudio e implicaciones para políticas y práctica

Es importante reconocer las limitaciones de este estudio. El análisis se basa en un único estudio de caso en una plantación comercial a gran escala; por lo tanto, la generalización de los hallazgos operativos a pequeños productores debe hacerse con cautela. Futuras investigaciones deberían validar estas dinámicas en fincas de menor escala. Así mismo, la revisión de la literatura, aunque

crítica, se enfoca en un conjunto específico de tecnologías y podría beneficiarse de un análisis comparativo con enfoques agroecológicos de bajo costo.

A pesar de estas limitaciones, las implicaciones de nuestros hallazgos son significativas. Para las políticas públicas, se evidencia que los subsidios para la compra de equipos son insuficientes si no van acompañados de inversión en infraestructura digital y programas de extensión agrícola 4.0. Para la práctica agrícola, la principal implicación es que la adopción de estas tecnologías debe ser vista como un cambio en el modelo de gestión basado en datos y no como la simple adquisición de una herramienta. Finalmente, para la industria tecnológica, se resalta la necesidad de desarrollar soluciones más asequibles y adaptadas a las condiciones de conectividad limitada del trópico.

Reconocimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a la administración y al equipo de campo de la Hacienda Los Amores por su inestimable colaboración y por facilitar el acceso a sus plantaciones para la realización del estudio de caso. Asimismo, agradecemos a los revisores anónimos cuyas críticas constructivas han mejorado significativamente la calidad de este manuscrito.

Esta investigación fue posible gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias) a través del Sistema General de Regalías (SGR), bajo el proyecto con BPIN 2022000100061. Se agradece la cooperación de las siguientes entidades en el marco de este proyecto: Corporación Innprende, Corporación Unificada Nacional - CUN, ICONTEC, Guada Holdings, Mertz Perú y AGAF. El presente artículo fue desarrollado por el equipo técnico de la Corporación Innprende.

Referencias

- [1] K. Peiris and W. Wimalaratana, “The cashew crucible: Progress, problems and prospects of the sri lankan cashew journey,” *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 2024.

- [2] G. M. Rwegasira, M. M. Mwatawala, R. G. Rwegasira, A. N. Rashidi, N. Wilson, and W. J. George, "Economic rationale of using african weaver ants, *Oecophylla lon ginoda* latreille (hymenoptera: Formicidae) for sustainable management of cashew pests in tanzania," in *Sustainable Agriculture Reviews*, 2020.
- [3] "Documento técnico de priorización productiva para el departamento del vichada," tech. rep., Gobernación de Vichada, OCAD, Colombia, 2020. Consultado para diagnostico agroproductivo del cultivo de Maraón.
- [4] G. K. Mahapatro, "Helopeltis management by chemicals in cashew: A critical concern," *Indian Journal of Entomology*, 2008.
- [5] J. Anikwe, F. Okelana, H. Otuonye, L. A. Hammed, and O. Aliyu, "The integrated management of an emerging insect pest of cashew: A case study of the cashew root and stemborer, *Placaederus ferrugineus* in ibadan, nigeria," *Journal of Agriculture, Forestry and the Social Sciences*, 2009.
- [6] F. Monteiro, M. M. Romeiras, J. Barnabe, S. Catarino, D. Batista, and M. Sebastiana, "Disease-causing agents in cashew: A review in a tropical cash crop," *Agronomy*, 2022.
- [7] M. K. Rajagopal and M. Balamurugan, "Artificial intelligence-based drone for early disease detection and precision pesticide management in cashew farming," *Conference Proceedings*, 2023.
- [8] S. R. Nayak, R. B. Hegde, A. S. Rao, and H. K. Sachidananda, "Revitalizing agriculture with the potential of cashew nutshell liquid: a comprehensive exploration and synergy with ai," *Deleted Journal*, 2024.
- [9] S. K. Swarnkar, Y. K. Rathore, and V. K. Swarnkar, *Machine learning models for early detection of pest infestation in crops*. 2024.
- [10] M. Mittal, V. Gupta, M. Aamash, and T. K. Upadhyay, "Machine learning for pest detection and infestation prediction: A comprehensive review," *Wiley Interdisciplinary Reviews-Data Mining and Knowledge Discovery*, 2024.
- [11] T. Ilakya, B. Lakshmi, S. Jeyanthi, U. Esakkiammal, T. Abinaya, and C. F. T. Cenate, "Towards resilient crops: Disease detection and pest control strategies," in *IEEE Conference on PECTS*, 2024.
- [12] D. Kapetas, P. Christakakis, S. Faliagka, Katsoulas, and E. M. Pechlivani, "Ai-driven insect detection, real-time monitoring, and population forecasting in greenhouses," *AgriEngineering*, 2025.
- [13] K. Dasari, S. A. Yadav, L. Kansal, J. Adilakshmi, G. Kaliyaperumal, and A. Albawi, "Fusion of hyperspectral imaging and convolutional neural networks for early detection of crop diseases in precision agriculture," 2024.
- [14] F. Ali, A. Razzaq, W. Tariq, A. Hameed, A. Rehman, K. Razzaq, S. Sarfraz, N. A. Rajput, H. E. M. Zaki, M. S. Shahid, and G. Ondrasek, "Spectral intelligence: Ai-driven hyperspectral imaging for agricultural and ecosystem applications," *Agronomy*, 2024.
- [15] N. P. Vidhya and R. Priya, "Automated diagnosis of the severity of tmb infestation in cashew plants using yolov5," *Journal of Image and Graphics*, 2024.
- [16] A. Upadhyay, N. S. Chandel, K. P. Singh, S. K. Chakraborty, B. M. Nandede, M. Ku mar, A. Subeesh, K. Upendar, A. Salem, and A. Elbeltagi, "Deep learning and computer vision in plant disease detection: a comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agriculture," *Artificial Intelligence Review*, 2025.

- [17] M. K. Rajagopal, B. Murugan, P. Arumugam, C. Rajurkar, R. Anand, and S. Kumar, "Intelligent drone design for precision cashew farming," 2024.
- [18] E. Singh, A. Pratap, U. Mehta, and S. Azid, "Smart agriculture drone for crop spraying using image-processing and machine learning techniques: Experimental validation," *Iot*, 2024.
- [19] R. Guebsi, S. Mami, and K. Chokmani, "Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges," *Drones*, 2024.
- [20] A. N. Barve, M. R. Lajurkar, S. B. Kharbade, A. Bagde, S. J. Waghmare, R. Karande, and S. K. Sathe, "Advancing precision agriculture: The role of uavs and drones in sustainable farming," *Asian Research Journal of Agriculture*, 2024.
- [21] S. Rishikesavan, P. Kannan, S. Pazhanivelan, R. Kumaraperumal, N. Sritharan, D. Muthumanickam, M. M. R. A. Firnass, V. Baskaran, and V. S. Teja, "Prospects and challenges of drone technology in sustainable agriculture," *Plant Science Today*, 2024.
- [22] R. Karmakar, T. Paul, and A. Mandal, "A prototype modeling of a smart agriculture monitoring system using iot based drones for spraying pesticides," *Research Square Preprint*, 2024.
- [23] L. Aiswarya, Siddharam, G. Rajesh, V. Gaddikeri, M. S. Jatav, J. Rajput, and K. Asha, "Smart irrigation management through unmanned aerial vehicles (uavs)," in *Smart Agricultural Technologies*, 2024.
- [24] H. Mahasneh, "Drones in agriculture : Real-world applications and impactful case studies," *Journal of Natural Science Reports*, 2024.
- [25] J. P. A. R. d. Cunha, L. d. L. Lopes, C. O. R. Alves, and C. B. d. Alvarenga, "Spray deposition and losses to soil from a remotely piloted aircraft and airblast sprayer on coffee," *AgriEngineering*, 2024.
- [26] O. Kholodyuk and O. Tokarchuk, "The efficiency of using agras drones for spraying, their design, technical and technological features," *Tehnika, Energetika, Transport APK*, 2022.
- [27] M. E. Mignoni, E. S. Monteiro, C. Zagonel, and R. Kunst, "Artificial intelligence and its tools in pest control for agricultural production : a review," *Recima21*, 2024.