



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2025,
Volumen 9, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

OPTIMIZACIÓN DEL SECTOR AGRÍCOLA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DATOS PARA UNA GESTIÓN EFICIENTE DE LOS RECURSOS NATURALES: UNA PERSPECTIVA PARA MÉXICO

**OPTIMIZING THE AGRICULTURAL SECTOR THROUGH DATA
ANALYSIS FOR EFFICIENT NATURAL RESOURCE
MANAGEMENT: A MEXICAN PERSPECTIVE**

Sindya Yadira Castillo Ortiz

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Iguala, Guerrero, México

Julio Cesar Flores Cabrera

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Iguala, Guerrero, México

Miguel Ángel Ayala Castillo

Investigador independiente, Guerrero, México

Christian David Carachure Pichardo

Investigador independiente, Guerrero, México

Amanda Ángel Ayala Castillo

Investigador independiente, Guerrero, México

Optimización del sector agrícola mediante el análisis de datos para una gestión eficiente de los recursos naturales: Una perspectiva para México

Sindya Yadira Castillo Ortiz¹

sindya.castillo@iguala.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0007-6065-6764>

Tecnológico Nacional de México/Instituto
Tecnológico de Iguala, Guerrero, México

Julio Cesar Flores Cabrera

jcesar.flores@iguala.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4344-9866>

Tecnológico Nacional de México/Instituto
Tecnológico de Iguala, Guerrero, México

Miguel Ángel Ayala Castillo

23670119@iguala.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0007-1688-3302>

Investigador independiente, Guerrero, México

Christian David Carachure Pichardo*

23670310@iguala.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0008-6535-6303>

Investigador independiente, Guerrero, México

Amanda Ángel Ayala Castillo

ami.211201.a35@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9680-6249>

Investigador independiente, Guerrero, México

RESUMEN

El cambio climático y el crecimiento poblacional han aumentado exponencialmente los desafíos para la agricultura, requiriendo soluciones innovadoras basadas en diversas tecnologías de hardware y software e inclusive algoritmos para análisis de datos y predecir las necesidades de nutrientes y climatológicas, rumbo a una optimización de los recursos. Este estudio explora la optimización del sector agrícola mediante técnicas de Agricultura de Precisión (AP), redes de sensores inalámbricos y sistemas de inteligencia artificial. Mediante un análisis exhaustivo de fuentes documentales, se identifican estrategias para mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales, reduciendo el impacto ambiental y aumentando la productividad. Los resultados indican que el uso de control difuso, sensores IoT, y aprendizaje automático pueden reducir el uso de herbicidas casi un 89%, disminuir la dosificación del fertilizante, y el error en la predicción del cultivo no supera el 12%. Los investigadores también presentan la necesidad de utilizar estas tecnologías, no solo como una oportunidad para la agricultura moderna, sino como la única forma de garantizar seguridad alimentaria para el mundo.

Palabras clave: agricultura de precisión, análisis de datos, sensores inalámbricos, inteligencia artificial, meteorología

¹ Autor principal

Correspondencia: sindya.castillo@iguala.tecnm.mx

Optimizing the agricultural sector through data analysis for efficient natural resource management: A Mexican perspective

ABSTRACT

Climate change and population growth have exponentially increased the challenges for agriculture, requiring innovative solutions based on diverse hardware and software technologies and even algorithms for data analysis and prediction of nutrient and weather needs for resource optimization. This study explores the optimization of the agricultural sector through Precision Agriculture (PA) techniques, wireless sensor networks, and artificial intelligence systems. Through a comprehensive analysis of documentary sources, strategies are identified to improve efficiency in the use of natural resources, reducing environmental impact and increasing productivity. The results indicate that fuzzy control, IoT sensors, and machine learning can reduce herbicide use by almost 89%, reduce fertilizer dosing, and the error in crop prediction does not exceed 12%. The researchers also present the need to use these technologies, not only as an opportunity for modern agriculture, but as the only way to ensure food security for the world.

Keywords: precision agriculture, data analytics, wireless sensors, artificial intelligence, meteorology

*Artículo recibido 13 febrero 2025
Aceptado para publicación: 19 marzo 2025*



INTRODUCCIÓN

Históricamente el sector agrícola, ha sido asociado a métodos tradicionalistas asociado con prácticas manuales y conocimientos más empíricos transmitidos de generación en generación, ahora experimenta una transformación radical. Esta revolución es impulsada por avances en procesamiento sistematizado de datos que redundan en las tecnologías de análisis de datos, que permiten a los agricultores tomar decisiones más informadas y eficientes (Smith et al., 2021).

Existe un efecto globalizado relacionado con el crecimiento poblacional y los efectos del cambio climático han impuesto una presión sin precedentes sobre el sector agrícola. Se ha vuelto imperativo optimizar el uso de recursos naturales como el agua y los fertilizantes, al tiempo que se minimizan los impactos ambientales (Jones & Turner, 2020).

En este contexto, la Agricultura 4.0 representa la evolución del sector agrícola hacia un modelo altamente tecnificado en algunos casos basado en experimentos previos asociado en la IoT, basado en la integración de tecnologías digitales avanzadas y sistemas inteligentes (Kong et al., 2019). Este concepto abarca múltiples dimensiones, desde la automatización con robots agrícolas, el uso de agricultura digital y smart farming, hasta la optimización de la gestión agroalimentaria mediante sistemas inteligentes de toma de decisiones y procesos sostenibles (Zhang et al., 2019).

En el ámbito científico, la Agricultura 4.0 incorpora metodologías de agricultura de precisión que surgen como una solución prometedora ante la alta demanda de productos agrícolas, combinando sensores, sistemas de información geográfica y herramientas avanzadas de análisis para gestionar la variabilidad espacial y temporal en los cultivos (Earl et al., 1996) (Wang et al., 2021). A nivel tecnológico, se sustenta en innovaciones como el Internet de las Cosas (IoT), sensores remotos, inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático (ML) y aprendizaje profundo (DL), entre otras (Chen et al., 2020). Estas herramientas permiten el análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real, optimizando recursos, aumentando la productividad y mejorando la sostenibilidad del sector (Li et al., 2021), todo lo anterior coadyuva a la generación propuestas que subsanan el déficit de algunos recursos.

METODOLOGÍA

Se consultaron fuentes documentales, incluidos artículos académicos, reportes de organizaciones internacionales y estudios de caso de empresas tecnológicas aplicadas al sector agrícola. Los datos recopilados se categorizaron en cuatro áreas principales: agricultura de precisión, inteligencia artificial, sensores, drones, meteorología aplicada, sostenibilidad y retos en la adopción tecnológica.

Estado Actual de las Tecnologías

La transformación digital del sector agrícola se caracteriza por una marcada heterogeneidad geográfica y tecnológica. Las tecnologías de big data no representan simplemente herramientas de recolección, sino verdaderas plataformas de inteligencia estratégica que reconfiguran los paradigmas tradicionales de producción (Wang & Zhang, 2020). La cadena de datos consta necesariamente de una capa técnica que captura datos en bruto y los convierte en información, y de una capa empresarial que toma decisiones y deriva valor de los servicios de datos y la inteligencia empresarial proporcionados. Ambas capas pueden entrelazarse en cada etapa y, en conjunto, conforman la base de lo que se conoce como la «cadena de valor de los datos» (Mayer et al., 2020).

En el contexto global, se observan patrones diferenciados de adopción tecnológica. Ello sin duda representa una brecha en los procesos productivos. Los países desarrollados han implementado ecosistemas tecnológicos complejos que integran sistemas de georreferenciación satelital, redes de sensores de alta precisión, plataformas de inteligencia artificial para predicción de rendimientos y sistemas de automatización agrícola con aprendizaje continuo (Hernández et al., 2019). En contraste, los países en desarrollo enfrentan barreras estructurales que limitan su transformación tecnológica (Zhao et al., 2020). Estas restricciones no son únicamente económicas, sino que involucran dimensiones como infraestructura de conectividad deficiente, limitada alfabetización digital en comunidades rurales, marcos regulatorios poco adaptados a la innovación tecnológica y brechas significativas en inversión en investigación y desarrollo agrícola (Bose & Kwon, 2020). Lo cual esta relacionada con un bajo rendimiento de los cultivos, y en algunos casos llega a producir la erosión de la tierra, al no contar con los recursos o conocimientos necesarios para implementación de técnicas como la rotación de cultivos.

El futuro del campo agrícola en México está estrechamente ligado a la adopción de tecnologías digitales que optimicen la producción y el uso eficiente de recursos. Innovaciones como drones y sensores remotos facilitan la detección temprana de plagas y enfermedades, mientras que los sistemas de riego inteligente contribuyen a la disminución del gasto desmedido de agua. La agricultura de precisión, apoyada en GPS y sistemas de información geográfica, facilita la optimización de insumos, aunque requiere capacitación especializada (Farmonaut. n.d.). Por otro lado, el uso de robots cosechadores incrementa la eficiencia en las cosechas, aunque su alto costo inicial representa un desafío (Farmonaut. n.d.). Finalmente, el análisis de datos mediante big data y machine learning permite realizar predicciones precisas de rendimiento, aunque su implementación enfrenta limitaciones en infraestructura. Proyectos en estados como Sinaloa, Guanajuato, Jalisco, Baja California y Querétaro reflejan los avances en estas áreas, evidenciando el potencial de la tecnología para transformar la agricultura mexicana, actualmente se están realizando estudios para permitir la implementación de estas tecnologías a costos asequibles.

Beneficios del Análisis de Datos en la Agricultura

El análisis de datos en la agricultura permite un uso más eficiente y responsable de los recursos naturales, optimizando la producción y reduciendo el impacto ambiental (Rao et al., 2021). A través de la recopilación y procesamiento de información clave, como la calidad del suelo, condiciones climáticas, patrones de plagas y rendimiento de cultivos, se logra maximizar los rendimientos y reducir costos operativos (Elkassabgi et al., 2019).

Además, la implementación de tecnologías basadas en datos facilita el mantenimiento de parámetros climáticos óptimos y el control de enfermedades y plagas, permitiendo la producción de vegetales de mayor calidad y en mayor cantidad (Adams et al., 2020). Asimismo, el análisis de datos contribuye a la autosuficiencia agrícola y fomenta la comercialización a gran escala de los productos cosechados, beneficiando a las familias agricultoras (Blanc & Pisoni, 2021).

Otro aspecto relevante es la reducción de horas de trabajo, lo que permite a los agricultores dedicar más tiempo a otras actividades productivas, sociales o familiares. De igual manera, se promueve un mejor desarrollo personal en los niños del campo, al reducir la carga laboral y mejorar sus oportunidades de educación y crecimiento social (Cepeda et al. 2010).



Desde una perspectiva económica, la agricultura juega un papel clave en el desarrollo de un país, ya que contribuye a la seguridad alimentaria, la generación de ingresos y el fortalecimiento de los mercados locales e internacionales (Hernández Pérez, Juan Luis. 2021). Su impacto va más allá de la producción de alimentos, pues también influye en la sostenibilidad ambiental y en la calidad de vida de las comunidades rurales (Hernández Pérez, Juan Luis. 2021).

Finalmente, el análisis de datos en la agricultura incentiva mayores inversiones en proyectos de alta tecnología, fortaleciendo la competitividad del sector y promoviendo un desarrollo agrícola más sostenible y eficiente (Cepeda et al. 2010).

Sensores IoT combinados con drones

La combinación de sensores IoT (Internet de las Cosas) con drones y satélites ha revolucionado la agricultura al generar grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo que permite a los agricultores optimizar el uso de recursos, minimizar desperdicios y mejorar la sostenibilidad de la producción agrícola (Chen et al., 2019). El IoT en la agricultura se basa en la conectividad entre dispositivos físicos y digitales mediante protocolos de comunicación estandarizados, permitiendo la monitorización continua de variables clave como humedad del suelo, condiciones climáticas y trazabilidad de la cadena agroalimentaria (Zhang et al., 2019).

Un estudio realizado en la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UASLP, San Luis Potosí, México, demostró que es posible monitorear la temperatura en un cultivo de invernadero mediante dispositivos electrónicos de bajo costo. En un invernadero de 1000 m², se implementó una red de sensores capaces de recopilar datos en distintos puntos, permitiendo identificar variaciones térmicas a lo largo del día. Los resultados mostraron que, mientras la temperatura se mantiene uniforme en las primeras horas de la mañana, hacia el mediodía se registran diferencias de 4 a 5 °C en una de las paredes del invernadero (Aguilar et al. 2023). Gracias a esta información, se lograron realizar riegos localizados, optimizando el uso del agua y mejorando la eficiencia del cultivo. Este proyecto representa un avance significativo para pequeños productores, ya que permite acceder a tecnologías agrícolas a un costo accesible. A futuro, se planea ampliar el estudio incorporando mediciones adicionales de variables climáticas como humedad relativa y luminosidad, así como el cálculo del índice de evapotranspiración para perfeccionar la gestión del recurso hídrico (Aguilar et al. 2023).



El uso de drones en la agricultura también ayuda a mitigar los efectos negativos de la actividad agrícola en el medio ambiente. La aplicación indiscriminada de fertilizantes y pesticidas puede causar contaminación del agua y degradación del suelo; sin embargo, mediante la agricultura de precisión basada en drones, es posible administrar estos insumos de manera localizada, reduciendo su impacto ambiental y los riesgos para la salud humana (Daponte, P., et al. 2019).

Además, los drones pueden emplearse en la inspección de grandes extensiones de tierra, optimizando la irrigación y detectando plagas o enfermedades a tiempo. Gracias a sensores avanzados, es posible medir la absorción de clorofila, identificar zonas afectadas por enfermedades y cuantificar la necesidad de insumos agrícolas (Daponte, P., et al. 2019).

A pesar de sus múltiples beneficios, los sistemas basados en drones presentan desafíos, como la falta de interoperabilidad entre plataformas y la necesidad de calibración específica para cada tarea. Para superar estos obstáculos, se están desarrollando interfaces y módulos de software que permitan integrar diferentes herramientas en un solo sistema, reduciendo la necesidad de intervención manual y mejorando la eficiencia operativa (Daponte, P., et al. 2019).

Redes de Sensores Inalámbricos en la Agricultura

Las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) representan una tecnología emergente con gran potencial para la agricultura moderna (Zhang & Zhang, 2021). Estas redes permiten la recolección continua de datos ambientales cruciales como temperatura, humedad y luminosidad, optimizando el uso del agua y los insumos agrícolas (Li et al., 2020).

Existen dos variantes principales de WSN utilizadas en aplicaciones agrícolas: las Redes de Sensores Inalámbricos Terrestres (TWSN) y las Redes de Sensores Inalámbricos Subterráneos (WUSN). En el caso de las TWSN, los nodos sensores están ubicados sobre la superficie del suelo, recolectando datos del entorno mediante sensores inteligentes y de bajo costo. Estos sensores pueden monitorear la humedad del suelo y, con base en los datos obtenidos, coordinar sistemas de riego automatizados para optimizar el uso del agua (Ojha et al. 2015).

Por otro lado, las WUSN tienen sensores enterrados en el suelo para monitorear condiciones edáficas. Dado que las señales de radiofrecuencia se atenúan considerablemente en el suelo, estas redes requieren más nodos para una cobertura efectiva. Sin embargo, ofrecen ventajas al proporcionar

información precisa sobre la humedad y los nutrientes disponibles en la tierra, mejorando así la eficiencia del riego y la aplicación de fertilizantes (Ojha et al. 2015).

Además, las WSN poseen características clave como la toma de decisiones inteligente mediante redes multi-hop, la configuración dinámica de la topología para optimizar la duración de la batería, la tolerancia a fallos y la capacidad de operar de manera autónoma. Estas cualidades las convierten en una herramienta clave para la automatización agrícola y la gestión eficiente de los recursos (Ojha et al. 2015).

Esto es la implementación de la tecnología puede ser un factor clave, rumbo a la agricultura sostenible.

Agricultura de Precisión

Plataformas de agricultura de precisión permiten identificar áreas específicas de un terreno que requieren atención particular, en lugar de aplicar insumos de manera uniforme (Burgos-Artizzu et al., 2007). Un avance significativo en este campo es la incorporación de técnicas de control y automatización en la Agricultura de Precisión (AP), que buscan optimizar el uso de agroquímicos considerando la diversidad del medio físico y biológico (Jones & Turner, 2020). Sobre todo considerar que la optimización de recursos incide a su vez en la optimización de resultados en la cosecha.

En particular, los sistemas de control basados en visión artificial permiten una dosificación selectiva de herbicidas mediante la generación de mapas de infestación y mapas de cultivo. Estos sistemas utilizan técnicas de interpolación para estimar la distribución de malezas y ajustar la cantidad de herbicida aplicada, minimizando el desperdicio y maximizando la eficiencia del tratamiento (Burgos-Artizzu et al., 2007).

Mediante técnicas como el control MIMO (Multiple Input, Multiple Output), es posible ajustar el caudal y la velocidad del tractor con base en condiciones específicas del campo. Investigaciones han demostrado que estos sistemas pueden reducir hasta un 89% el uso de herbicidas en comparación con métodos tradicionales, sin comprometer la efectividad del tratamiento (Burgos-Artizzu et al., 2007).

En otro estudio se presenta un sistema de análisis de imágenes basado en computadora que permite procesar fotografías de campos de cultivo para estimar los porcentajes de maleza, cultivo y suelo. Utiliza un sistema de razonamiento basado en casos (CBR) que selecciona automáticamente el mejor método de procesamiento para cada imagen en tiempo real (Burgos et al., 2009).



El principal desafío en el análisis de imágenes es lograr una discriminación precisa entre maleza, cultivo y suelo bajo condiciones variables de luz, textura del suelo y estado del cultivo. El sistema desarrollado ha sido probado con imágenes de diferentes campos y condiciones ambientales, logrando una correlación del 80% con datos reales (Burgos et al., 2009).

Integración de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático

La convergencia de inteligencia artificial y agricultura representa una revolución metodológica que trasciende la mera implementación tecnológica (Guan et al., 2020). Los algoritmos de aprendizaje automático actúan como sistemas cognitivos avanzados capaces de interpretar patrones complejos en datos agrícolas multidimensionales, optimizando estrategias de irrigación y fertilización en tiempo real (Bose & Kwon, 2020). Sobre todo, considerar la posibilidad de optimizar el recurso hídrico en algunos poblados donde es limitado el acceso al vital líquido

Los modelos predictivos incorporan variables heterogéneas como:

- Registros históricos de rendimiento
- Datos satelitales de cobertura vegetal
- Información meteorológica de alta resolución
- Características edafológicas locales

Además, el uso de redes neuronales convolucionales (*CNN*), redes neuronales recurrentes (*RNN*) y otras arquitecturas computacionales permiten detectar enfermedades en cultivos o la presencia de maleza no deseada, aumentando la eficiencia del manejo agrícola (Kirtan Jha et al. 2019). A su vez, la integración de robótica en el sector agrícola permite la automatización de procesos clave como la siembra, fertilización, riego, control de maleza, cosecha e incluso el pastoreo, reduciendo significativamente la necesidad de mano de obra y aumentando la eficiencia operativa (Jha et al. 2019).

El futuro de la agricultura se dirige hacia un modelo de *farming* de precisión donde la gestión se realiza a nivel de cada planta individual [16]. Tecnologías como el *deep learning* facilitan la identificación del tipo de planta, flor o fruto, lo que permite a los agricultores ajustar las condiciones de crecimiento para fomentar una producción más diversificada y personalizada. Asimismo, la aplicación de *IoT* y protocolos de comunicación avanzados posibilitan el monitoreo y control

automatizado en entornos como los invernaderos, reduciendo la dependencia de la intervención humana (Kirtan Jha et al. 2019).

La inteligencia artificial (IA) ha revolucionado el análisis predictivo en la agricultura, permitiendo a los productores anticipar patrones de costos y demanda en el mercado con una precisión sin precedentes. A través de algoritmos de aprendizaje automático (*ML*), es posible calcular la producción y el rendimiento de cultivos como el tomate, predecir precios futuros, obtener recomendaciones estratégicas sobre qué variedades plantar para maximizar sus ganancias y los niveles esperados de demanda. La automatización de la cosecha mediante IA no solo optimiza tiempos, sino que también permite clasificar los productos según su grado de maduración antes de su distribución al mercado (Galaz et al., 2021). De esta manera, la IA transforma la gestión agrícola en un modelo más eficiente y rentable.

Esta integración tecnológica transforma la agricultura reactiva en un modelo proactivo y anticipatorio, donde cada decisión se basa en el análisis de datos en tiempo real y la optimización de recursos, garantizando una producción más eficiente y sostenible.

Modelo Predictivo en Agricultura

La implementación de modelos predictivos utilizando técnicas de minería de datos representa una frontera prometedora. Rodríguez et al. (Rodríguez et al., 2021). exploraron diferentes algoritmos para predecir condiciones ambientales en invernaderos, incluyendo regresión lineal, redes neuronales y máquinas de vectores de soporte (SVM).

Los resultados mostraron que el algoritmo SVM presentó un error absoluto relativo de solo 11.33 %, correspondiente a un error absoluto medio de 0.698°C (Rodríguez et al., 2021)., posicionándose como el modelo de predicción más preciso. Actualmente, se continúa investigando diferentes parametrizaciones del algoritmo para mejorar aún más su rendimiento.

Esta tecnología representa una herramienta fundamental para el sector agrícola, facilitando la toma de decisiones en la gestión de parámetros agroecológicos como temperatura, luminosidad y humedad relativa. Su implementación en invernaderos permite un monitoreo constante y posibilita acciones preventivas o correctivas cuando sea necesario, sin necesidad de presencia física en el invernadero para la supervisión en tiempo real.



El estudio realizado en año 2025 en la Universidad de Craiova ejemplifica la evolución del uso de modelos predictivos en la agricultura mediante la integración de tecnologías digitales avanzadas, promoviendo un enfoque basado en datos para optimizar la productividad y sostenibilidad del sector. En este contexto, se han aplicado modelos como ARIMA y redes neuronales artificiales (ANNs) para analizar la relación entre la digitalización, medida a través del índice de economía y sociedad digital (*DESI*), y el desempeño agrícola (Vărzaru, A. A. 2025). El modelo ARIMA ha sido seleccionado por su capacidad de capturar relaciones temporales directas y dinámicas entre la digitalización y variables clave como la productividad laboral real por persona y la producción agrícola (Vărzaru, A. A. 2025). Por otro lado, las ANNs permiten identificar interdependencias no lineales que los modelos tradicionales podrían pasar por alto, proporcionando un análisis detallado sobre cómo el crecimiento económico, representado por el PIB per cápita real, influye en la producción agrícola (Vărzaru, A. A. 2025).

Asimismo, el suavizado exponencial de Brown complementa estos enfoques al capturar tendencias de largo plazo y variaciones estacionales en series temporales extensas (Velasco et al. 2015). La combinación de estos métodos predictivos respalda la toma de decisiones informadas en el sector, optimizando el uso de recursos y mejorando la resiliencia ante cambios climáticos y económicos. Además, los hallazgos destacan el impacto positivo y significativo de la digitalización en la productividad agrícola, alineándose con estudios previos sobre Agricultura 4.0, que resaltan el papel de tecnologías como IoT, IA y robótica en la optimización de procesos, reducción de desperdicios, beneficios económicos y mejora de la resiliencia climática.

Observaciones meteorológicas cuantificadas

El monitoreo meteorológico es esencial para la agricultura, ya que influye en la productividad. En México, la mayoría de las estaciones meteorológicas automatizadas (EMA) son importadas y difíciles de reparar debido a costos y falta de conocimiento técnico. Además, las estaciones comerciales no siempre cumplen con los requisitos específicos de la investigación agronómica (Velasco et al. 2015).

Este estudio presenta el desarrollo de un prototipo de EMA diseñado por estudiantes del Instituto Tecnológico de la Laguna, el cual permite ajustes en sensores y tiempos de muestreo. El prototipo fue instalado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y validado

comparando sus mediciones con las de dos estaciones comerciales cercanas, obteniendo correlaciones de 0.95 en radiación global y 0.91 en temperatura (Velasco et al. 2015).

Los resultados muestran que el prototipo es funcional y más económico que las estaciones comerciales. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora, como la altura de los sensores y la validación de ciertas variables. La capacidad de modificar su programación y agregar nuevos sensores permite su adaptación a necesidades específicas de la meteorología agrícola, como el cálculo de la evapotranspiración potencial (ET₀) utilizando modelos como FAO-PM y Hargreaves-Samani (Velasco et al. 2015)

Impacto en el cambio climático

La **agricultura de precisión (PA)** juega un papel clave en la mitigación del **cambio climático**, ya que reduce las **emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)** mediante una optimización eficiente de insumos agrícolas. Tecnologías como la **aplicación variable de nutrientes (VRNA)** minimizan el uso excesivo de fertilizantes, reduciendo la liberación de **óxido nitroso (N₂O)**, uno de los GEI más potentes. Asimismo, los **sistemas de riego de tasa variable (VRI)** optimizan el uso del agua, disminuyendo el consumo energético y limitando las emisiones derivadas del uso de fertilizantes en el suelo (Balafoutis, et al. 2017). Estas innovaciones no solo **reducen el impacto ambiental**, sino que también **mejoran la productividad agrícola**, garantizando rendimientos óptimos con un menor costo operativo.

Además, prácticas como el **tráfico controlado (CTF)** y el **guiado automático de maquinaria (MG)** disminuyen el uso de tractores, reduciendo el consumo de **combustibles fósiles** y, por ende, las emisiones directas de GEI. La **aplicación variable de pesticidas (VRPA)** contribuye a la reducción del impacto ambiental al disminuir la cantidad de agroquímicos utilizados, evitando la contaminación del **agua, suelo y aire** (Balafoutis, et al. 2017). Sin embargo, para maximizar la adopción de la PA, es esencial proporcionar a los agricultores **datos cuantificables** sobre sus beneficios económicos y ambientales, así como facilitar el acceso a tecnologías más **precisas y asequibles**. Fomentar la investigación sobre la interacción entre nutrientes y emisiones de GEI permitirá desarrollar estrategias más eficientes para una **agricultura sostenible y resiliente al cambio climático**.

Factores determinantes en la adopción de agricultura de precisión

Las **tecnologías de agricultura de precisión (PATs)** son herramientas diseñadas para gestionar la **variabilidad espacial y temporal** en la producción agrícola, optimizando **rendimiento, calidad y rentabilidad** mientras reducen insumos e impacto ambiental. A pesar de su potencial, la adopción de estas tecnologías enfrenta barreras como **altos costos iniciales, incertidumbre en el retorno de inversión y desconfianza en su eficacia**. En Europa, la adopción de PATs es menor en comparación con EE.UU. y Australia, lo que sugiere la necesidad de incentivos financieros y no financieros para fomentar su implementación (Barnes et al. 2019).

El apoyo técnico y la capacitación pueden impulsar la adopción en agricultores que aún no usan PATs, mientras que quienes ya las emplean responden mejor a regulaciones ambientales más estrictas, reconociendo su papel en el **cumplimiento normativo** (Barnes et al. 2019). Además, superar desafíos como la **conectividad en zonas rurales** y fortalecer los servicios de análisis de datos son factores clave para integrar estas tecnologías de manera efectiva en la agricultura comercial y garantizar su impacto en la **sostenibilidad y productividad** del sector.

Un estudio realizado en Zambia ha demostrado el potencial de las aplicaciones móviles para mejorar la recolección de datos en **sistemas agrícolas de pequeña escala**. Mediante la aplicación "**Time-Tracker**", los investigadores analizaron cómo la mecanización agrícola afecta la **distribución del tiempo y la nutrición dentro de los hogares**, proporcionando datos en **tiempo real y con menor costo** en comparación con métodos tradicionales (Daum, et al. 2018). Este enfoque no solo valida el uso de aplicaciones móviles para la investigación agrícola, sino que también abre nuevas posibilidades para recopilar información detallada en regiones con altos niveles de analfabetismo y baja penetración tecnológica.

A futuro, el desarrollo de versiones **portátiles y accesibles** de estas herramientas basadas en **Big Data** permitirá la integración de sensores de movimiento, ambientales y de posición, optimizando la **precisión y escalabilidad** del análisis agrícola. Con el aumento en la propiedad de **smartphones en comunidades rurales**, estas aplicaciones podrían evolucionar hacia sistemas de **ciencia ciudadana y crowdsourcing**, involucrando directamente a los agricultores en la generación de datos y facilitando una **gestión más eficiente y sostenible** de los recursos agrícolas.



CONCLUSIONES

La integración de tecnologías avanzadas como la Agricultura de Precisión, sensores IoT y sistemas de inteligencia artificial representa no solo una oportunidad para modernizar el sector agrícola, sino también una necesidad crítica para enfrentar los desafíos globales actuales (Jones & Turner, 2020). Sin embargo, la adopción de estas tecnologías enfrenta obstáculos importantes, como la brecha digital en zonas rurales, los altos costos iniciales de implementación y la necesidad de capacitar a los agricultores en el uso de herramientas tecnológicas. De ahí la trascendencia de lograr un mayor apoyo al campo mediante estudios experimentales con diversos cultivos, con diversos ambientes controlados, que simulen la realidad del medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R., Pisoni, E., & Hernández, S. (2020). *Impact of data analysis in agricultural productivity*. International Journal of Agricultural Science, 25(3), 152-160.
- Aguilar-González, Rafael, Cárdenas-Juárez, Marco, Rodríguez-Ortiz, Juan Carlos, & Romero-Méndez, Mauricio Jesús. (2023). Monitoreo de Temperatura Mediante Red de Sensores para Mejorar el Uso del Agua en la Agricultura. Terra Latinoamericana, 41, e1626. Epub 16 de febrero de 2024.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1626>, https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792023000100503&script=sci_arttext
- Balafoutis, et al. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 9(8), 1339.
<https://doi.org/10.3390/su9081339>
- Barnes et al. (2019). Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. *Environmental Science & Policy*, 93, 66–74.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.014>
- Blanc, A., & Pisoni, M. (2021). *Data-driven approaches to improving agricultural marketing strategies*. Journal of Agri-business Research, 16(2), 45-53.
- Bose, S., & Kwon, Y. (2020). *Challenges in the adoption of digital agriculture technologies*. Journal of Technology in Agriculture, 5(1), 12-20.



- Burgos-Artizzu, X., et al. (2007). *Use of multivariable controllers for precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 61(2), 128-135.
- Burgos-Artizzu, X.P., Ribeiro, A., Tellaeche, A., Pajares, G. & Fernández-Quintanilla, C. (2009). Improving weed pressure assessment using digital images from an experience-based reasoning approach. Computers and Electronics in Agriculture, 65(2), 176-185.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169908002032>
- Cepeda Rode, R. J. Rocha Gamarra, H. E. Ponce Espinosa, A. I. García-Ravizé Guizar, D. C. Romero Díaz, P. Ponce Cruz, *A. Molina Gutiérrez (2010), *Invernadero Inteligente basado en un Enfoque Sustentable*, VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, 24 al 26 de noviembre de 2010, Cuernavaca Morelos, México.
https://www.researchgate.net/profile/Arturo-Molina/publication/264045356_Invernadero_Inteligente_basado_en_un_Enfoque_Sustentable_para_la_Agricultura_Mexicana/links/555bcac108ae8f66f3ad7e85/Invernadero-Inteligente-basado-en-un-Enfoque-Sustentable-para-la-Agricultura-Mexicana.pdf
- Chen, L., et al. (2020). *IoT-based systems in precision agriculture*. Journal of Agricultural Engineering, 42(4), 65-72.
- Chen, Q., et al. (2019). *Drone and IoT-based monitoring for agricultural applications*. Journal of Environmental Management, 20(5), 112-120.
- Daum, et al. (2018). Smartphone apps as a new method to collect data on smallholder farming systems in the digital age: A case study from Zambia. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.017>
- Elkassabgi, S., et al. (2019). *Improving crop yields with data analytics in precision farming*. Agricultural Systems, 42(3), 213-225.
- Farmonaut. (n.d.). Innovación agrícola en México: Cómo la tecnología digital está transformando el futuro de la agricultura. Farmonaut. <https://farmonaut.com/south-america/innovacion-agricola-en-mexico-como-la-tecnologia-digital-esta-transformando-el-futuro-de-la-agricultura/>
- Galaz, V., Centeno, M. A., Callahan, P. W., Causevic, A., Patterson, T., Brass, I., Baum, S., Farber, D., Fischer, J., Garcia, D., McPhearson, T., Jimenez, D., King, B., Larcey, P., & Levy, K. (2021).



- Artificial intelligence, systemic risks, and sustainability. *Technology in Society*, 67, 101741.
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101741>
- Guan, X., et al. (2020). *AI applications in precision agriculture for efficient resource management*. Journal of Smart Farming, 18(2), 99-107.
- Hernandez, M., et al. (2019). *The role of AI and machine learning in global agriculture*. Smart Agriculture Review, 34(2), 74-81.
https://www.researchgate.net/publication/373541402_The_Role_of_Artificial_Intelligence_and_Machine_Learning_in_Smart_and_Precision_Agriculture
- Hernández Pérez, Juan Luis. (2021). La agricultura mexicana del TLCAN al TMEC: consideraciones teóricas, balance general y perspectivas de desarrollo. *El trimestre económico*, 88(352), 1121-1152. Epub 13 de diciembre de 2021. <https://doi.org/10.20430/ete.v88i352.1274>
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>
- Jones, G., & Turner, R. (2020). *Big data's impact on sustainable agriculture practices*. Sustainability Science, 32(6), 113-118.
- Kong, Z., et al. (2019). *Future perspectives of digital agriculture*. Precision Agriculture Research, 12(1), 56-63.
- Li, Y., et al. (2020). *IoT and wireless sensor networks in agricultural data collection*. Environmental Technology and Innovation, 15, 112-120.
- Mayer, J., et al. (2020). *Data value chains and digital agriculture*. Journal of Agri-Tech, 25(5), 150-160.
- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169915002379>
- Pasquale Daponte et al 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 275 012022,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/275/1/012022/pdf>



- Rodríguez, P., et al. (2021). *Predictive modeling for greenhouse environments in agriculture*. Environmental Monitoring, 14(7), 25-31.
- Smith, R., et al. (2021). *Technological transformations in modern farming*. Journal of Digital Agriculture, 19(8), 110-118.
- Vărzaru, A. A. (2025). Digital revolution in agriculture: Using predictive models to enhance agricultural performance through digital technology. *Agriculture*, 15(3), 258. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030258>
- Velasco Martínez, V. D., Flores García, F. G., González Cervantes, G., Flores Medina, M. de J., & Moreno Casillas, H. A. (2015). Desarrollo y validación de una estación meteorológica automatizada de bajo costo dirigida a agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(6), 1253–1264. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-093420150006000009&script=sci_arttext
- Wang, H., & Zhang, T. (2020). *Agricultural data value chains in modern farming practices*. International Journal of Data Science in Agriculture, 8(4), 56-63.
- Wang, X., et al. (2021). *Precision agriculture with big data analytics*. Agricultural Data Analysis, 22(9), 98-110.
- Zhang, Z., et al. (2019). *IoT in agriculture: Bridging digital technologies with sustainable farming*. Agricultural Systems, 21(3), 89-96.
- Zhao, L., et al. (2020). *Technological adoption barriers in developing countries*. International Journal of Agricultural Technology, 12(5), 72-80.