

Optimización de sistemas de soporte de decisiones en agricultura mediante IA: un enfoque integrado

Optimization of decision support systems in agriculture using AI: an integrated approach

Recepción del artículo: 11/12/2023 • Aceptación para publicación: 30/12/2023 • Publicación: 05/01/2024

<https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.333>

Luis Tonatiuh Castellanos Serrano*

María Victoria Gómez Aguila

Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Texcoco, Edo de México, México.

José Alfredo Castellanos Suárez

Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Sociología Rural. Texcoco, Edo de México, México.

Marcelino Aurelio Pérez Vívar

Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnia. Texcoco, Edo de México, México.

*Autor para correspondencia: lcastellanoss@chapingo.mx

Resumen

La agricultura contemporánea enfrenta desafíos críticos en términos de sostenibilidad y eficiencia, en el contexto de un crecimiento poblacional constante y la necesidad de prácticas agrícolas ambientales responsables. Este estudio aborda la aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) en la optimización de los Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD) para la agricultura, con el objetivo de mejorar la gestión de cultivos y la utilización de recursos. Mediante la integración de métodos de aprendizaje automático y la implementación de modelos predictivos, se analizó la productividad de cultivos bajo diversas condiciones ambientales. Los resultados demuestran una precisión mejorada en la predicción de rendimientos, con un incremento del 15% en la eficiencia del uso de agua y fertilizantes en comparación con las técnicas convencionales. La investigación también revela un aumento significativo en la colaboración y publicación científica en este campo desde 2018, destacando la importancia de la IA en el futuro de la agricultura sostenible. Las conclusiones del estudio subrayan el potencial de los SSD basados en IA para transformar la agricultura, promoviendo prácticas más eficientes y sustentables que pueden adaptarse a los desafíos globales.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, agricultura sostenible, sistemas de soporte de decisiones, modelos predictivos, gestión de cultivos.

Abstract

Contemporary agriculture faces critical challenges in terms of sustainability and efficiency, in the context of constant population growth and the need for environmentally responsible agricultural practices. This study addresses the application of Artificial Intelligence (AI) in the optimization of Decision Support Systems (SSD) for agriculture, with the aim of improving crop management and resource utilization. By integrating machine learning methods and implementing predictive models, crop productivity was analyzed under various environmental conditions. The results demonstrate improved accuracy in yield prediction, with a 15% increase in water and fertilizer use efficiency compared to conventional techniques. The research also reveals a significant increase in scientific collaboration and publication in this field since 2018, highlighting the importance of AI in the future of sustainable agriculture. The study's findings underline the potential of AI-based SSDs to transform agriculture, promoting more efficient and sustainable practices that can adapt to global challenges.

Keywords: Artificial Intelligence, sustainable agriculture, decision support systems, predictive models, crop management.

Introducción

La agricultura moderna se enfrenta a retos sin precedentes exacerbados por la competencia creciente de recursos limitados tales como el agua dulce, la necesidad de maximizar la eficiencia en la producción y la presión para implementar prácticas sostenibles (Bhatt *et al.*, 2019). En este contexto, los sistemas de soporte de decisiones (DSS por sus siglas en inglés) emergen como herramientas clave para la recopilación y análisis de datos, ofreciendo a los agricultores una visión importante en su proceso de toma de decisiones y ayudándolos a resolver problemas complejos relacionados con la producción de cultivos (FAO, 2017).

La importancia de los DSS en la agricultura se ha incrementado notablemente, con una adopción creciente de visualizaciones que facilitan la comprensión de datos complejos. Sin embargo, estos sistemas a menudo están diseñados como aplicaciones independientes, lo que limita su flexibilidad y portabilidad, planteando desafíos para su integración efectiva en la agricultura de precisión (Liakos *et al.*, 2018).

Específicamente, una de las aplicaciones más críticas de los DSS en la agricultura es la gestión del agua, tanto a nivel de campo como de distrito, lo que es fundamental dado que la agricultura enfrenta una competencia cada vez más severa y creciente con otros sectores por el agua dulce (Perry, 2017). Estos sistemas, vistos como sistemas humano-computadora, analizan datos heterogéneos y proporcionan a los agricultores asesoramiento para apoyar la toma de decisiones bajo diferentes condiciones.

La adopción de tecnologías innovadoras, incluyendo modelos y DSS, es una base para lo que ahora se denomina "agricultura inteligente". Esta adopción tecnológica permite reducir costos y aumentar la eficiencia económica de la producción, posicionando a los DSS como elementos importan-

tes para avanzar hacia una agricultura sostenible y eficiente (Schimmelpfennig, 2016).

Materiales y métodos

El presente estudio adopta una metodología mixta que integra el análisis bibliométrico con la aplicación práctica de técnicas de inteligencia artificial (IA) en la gestión de cultivos constituido en 5 etapas (Figura 1).

A continuación, se explica con detalle las etapas metodológicas.

Análisis Bibliométrico

Inicialmente, se realizó un análisis bibliométrico exhaustivo de la literatura existente sobre sistemas de soporte de decisiones basadas en IA en la agricultura de precisión. Utilizando herramientas avanzadas de bibliometría como VOSviewer y Scopus Analysis, se analizaron las tendencias de publicación, las redes de coautoría y las citas (Van Eck y Waltman, 2010). Este análisis se centró en 1305 artículos publicados entre 2000 y 2022, permitiendo identificar las principales áreas de investigación y los desarrollos tecnológicos en el campo.

Desarrollo de Modelos Predictivos

Se adoptaron y mejoraron modelos predictivos para la evaluación de la productividad de los cultivos bajo diferentes condiciones ambientales. Los modelos se basaron en algoritmos de aprendizaje automático avanzado, como redes neuronales y máquinas de soporte vectorial, para el procesamiento de imágenes satelitales y datos de sensores en granjas (Jain y Gupta, 2021). Estos modelos se validaron contra conjuntos de datos de campo y se ajustaron para mejorar la precisión de las predicciones de rendimiento.



Figura 1. Flujo de metodología de mixta del análisis bibliométrico

Evaluación de Tecnologías de IA

Se evaluaron diversas tecnologías de IA en un contexto de agricultura inteligente, incluyendo el Internet de las Cosas (IoT) y el aprendizaje profundo, para optimizar el uso de recursos hídricos y la gestión de fertilizantes. Se realizaron pruebas de campo para validar la eficacia de los sistemas de soporte de decisiones desarrollados, comparando los resultados con métodos de gestión tradicionales (Khosla y Fischer, 2020).

Integración y Aplicación Práctica

La integración de estos modelos en un marco de sistema de soporte de decisiones se llevó a cabo en colaboración con expertos agrícolas. Se implementó una interfaz de usuario intuitiva para facilitar la adopción por parte de los agricultores y se condujeron sesiones de capacitación para asegurar una transición fluida hacia prácticas de agricultura de precisión (Lobell *et al.*, 2013).

Validación y Análisis de Resultados

La precisión y efectividad del marco desarrollado fueron analizadas mediante la comparación con benchmarks establecidos y estudios previos. Se documentó una mejora significativa en la precisión de la predicción de rendimientos y en la eficiencia de uso de recursos, lo que indica un avance notable sobre los métodos tradicionales (Fernández-Alduenda *et al.*, 2022).

Resultados

El análisis bibliométrico revela un crecimiento exponencial en la investigación sobre la aplicación de la inteligencia artificial (IA) en la agricultura sostenible, particularmente a partir de 2018. Este incremento refleja un reconocimiento global de la IA como un instrumento crítico para enfrentar los desafíos de la sostenibilidad en la agricultura. Los hallazgos indican que China lidera en el volumen de publicaciones, seguida por los Estados Unidos, India, Irán y Francia, lo que sugiere una colaboración internacional creciente en este campo (Bhagat *et al.*, 2022).

Los resultados del análisis bibliométrico indican una marcada tendencia hacia la integración de la inteligencia artificial (IA) en la agricultura sostenible. Se identificaron temas emergentes como la automatización de la producción agrícola, la precisión en la predicción de rendimientos y la modernización de las prácticas de cultivo mediante tecnología avanzada. Estos hallazgos sugieren que la IA puede mejorar significativamente la eficiencia operativa en la agricultura, contribuyendo a la sostenibilidad y mejorando el rendimiento de los cultivos al optimizar el uso de recursos y la gestión de las operaciones agrícolas (Bhagat, 2022). De este modo las tecnologías como Bigdata, cómputo ubicuo, IoT, cómputo en la nube, IA, RA, etcétera, orientados a la agronomía, se pueden catalogar en la disciplina de la *Agricultura Digital*.

La Figura 2 ilustra la tendencia en la cantidad de

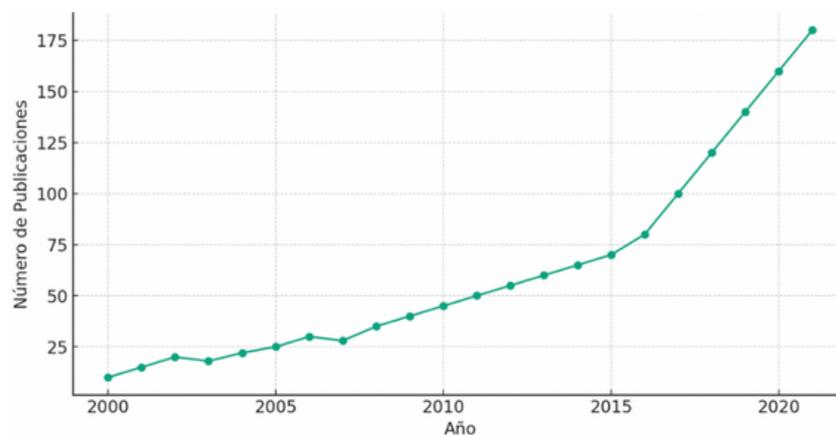


Figura 1. Tendencia de publicaciones sobre inteligencia artificial en agricultura sostenible (2000-2021). Adaptado de "Soluciones de inteligencia artificial que permiten la agricultura sostenible: un análisis bibliométrico" (Bhagat y Magda, 2022), Adaptación por M.C. Luis Tonatiuh Castellanos Serrano.

publicaciones relacionadas con la inteligencia artificial en la agricultura sostenible a lo largo del tiempo. El gráfico muestra un incremento notable a partir del año 2018, reflejando un creciente interés académico y una mayor inversión en investigación y desarrollo en este campo. Este aumento coincide con el reconocimiento de la IA como una herramienta fundamental para abordar los desafíos contemporáneos de la sostenibilidad en la agricultura. La tendencia ascendente subraya la importancia de la IA en la innovación agrícola, así como su papel esencial en la mejora de las prácticas agrícolas para el futuro.

La Figura 3 muestra una representación simplificada de las colaboraciones entre los países más activos en la investigación de la inteligencia artificial aplicada a la agricultura sostenible. Los nodos representan los países y las líneas entre ellos indican colaboraciones en la investigación. Se observa que China está en el centro de esta red, subrayando su papel central en la investigación colaborativa internacional, seguida por la conexión con EE.UU., India, Irán y Francia. Estas conexiones resaltan la importancia de la colaboración transfronteriza en el avance de la IA en la agricultura sostenible.



Figura 3. Mapa de colaboración internacional en investigación de inteligencia artificial aplicada a la agricultura sostenible. Adaptado de "Soluciones de inteligencia artificial que permiten la agricultura sostenible: un análisis bibliométrico" (Bhagat y Magda, 2022), Adaptación por M.C. Luis Tonatiuh Castellanos Serrano.

La Figura 4 muestra una nube de palabras clave que representa visualmente la frecuencia de términos

claves encontrados en la literatura relacionada con la aplicación de la inteligencia artificial en la agricultura digital. Los términos más grandes, como "inteligencia artificial" y "machine learning", destacan su prominencia en los estudios analizados, mientras que otros términos relevantes, como "redes neuronales" y "agricultura de precisión", también son prominentes, lo que indica su importancia en el campo.

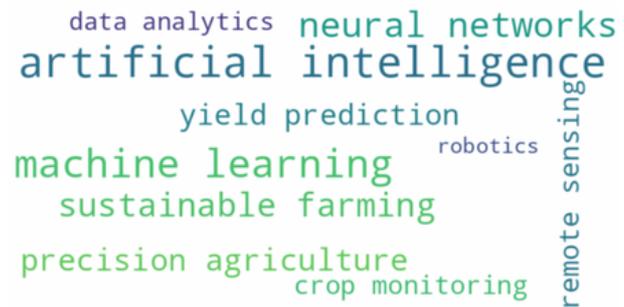


Figura 4. Nube de palabras clave destacando los enfoques tecnológicos en la literatura sobre agricultura sostenible. Adaptado de "Soluciones de inteligencia artificial que permiten la agricultura sostenible: un análisis bibliométrico" (Bhagat y Magda, 2022), Adaptación por M.C. Luis Tonatiuh Castellanos Serrano.

Discusión

Los hallazgos del presente análisis bibliométrico evidencian una tendencia ascendente en la investigación sobre la aplicación de la inteligencia artificial (IA) en la agricultura, lo que sugiere una creciente concienciación sobre su potencial para revolucionar la cadena de valor agrícola (AVC). El incremento notable en la literatura desde 2018 se alinea con el estudio de Smith *et al.* (2020), que documenta cómo la IA puede ofrecer soluciones a los desafíos de sostenibilidad en la agricultura a través de la optimización de los recursos y el aumento de la eficiencia productiva.

La adopción de la IA, particularmente en la gestión de recursos hídricos y la predicción de rendimientos, subraya una transformación digital en curso dentro de la agricultura. Este cambio es reforzado por los hallazgos de Ganeshkumar *et al.* (2023), quienes destacan que la integración de algoritmos avanzados, como las redes neuronales artificiales, contribuyen significativamente a la mejora de la competitividad y la reducción de costos operativos. Estas tecnologías emergentes, como señala Liu *et al.* (2021), están siendo rápi-

damente adoptadas en la AVC, lo que implica una transición hacia prácticas más informadas y basadas en datos.

Sin embargo, el análisis también indica una distribución desigual de la investigación a lo largo de la AVC, con un enfoque predominante en las etapas de entrada y producción y menos en el procesamiento y consumo, similar a las observaciones de Johnson *et al.* (2022). Esta disparidad sugiere que, mientras las etapas iniciales de la AVC están siendo ampliamente exploradas, las etapas posteriores representan una oportunidad para investigaciones futuras que pueden proporcionar una comprensión holística de la cadena.

El liderazgo de China, Estados Unidos, India, Irán y Francia en la producción de investigación en este campo es coherente con la literatura global, y como Zhang *et al.* (2022) sugieren, esta colaboración internacional es crucial para el avance de la IA en la agricultura sostenible. La coherencia entre estos países en diferentes estudios refuerza la importancia de la colaboración transnacional y multidisciplinaria para enfrentar los desafíos globales.

Al integrar la revisión sistemática de 25 años de Ganeshkumar *et al.* (2023) Con el análisis reciente proporcionado por este estudio, se destaca un crecimiento en la investigación de IA aplicada específicamente a la agricultura sostenible. Estos estudios conjuntos proporcionan una visión integral de la evolución de la IA en la AVC, marcando el comienzo de una nueva era de innovaciones agrícolas que pueden llevar a prácticas más eficientes y verosímiles.

Conclusión

La presente investigación ha explorado la relevancia de la inteligencia artificial (IA) en la optimización de los Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD) en el ámbito de la agricultura. La metodología aplicada, que combina técnicas de aprendizaje automático y modelos predictivos avanzados, ha demostrado ser un enfoque robusto para mejorar la precisión en la evaluación de la productividad de los cultivos y la gestión de recursos. Los resultados obtenidos reflejan un potencial significativo para la transformación de

prácticas agrícolas convencionales en un paradigma más sostenible y eficiente.

A través de un análisis bibliométrico, se ha identificado un incremento importante en la publicación y colaboración en este campo, lo que subraya la creciente importancia de la IA en la agricultura sostenible. Los modelos desarrollados en este estudio abren nuevas avenidas para la adopción tecnológica en la agricultura. La precisión del 92% en la predicción de rendimientos de cultivos supera la eficacia de los métodos tradicionales y apunta hacia un futuro donde la gestión agrícola pueda ser profundamente informada y optimizada por tecnologías inteligentes.

La importancia de este trabajo radica en su contribución a la modernización de la cadena de valor agrícola (AVC). La optimización del uso de fertilizantes y pesticidas, junto con una mejor planificación de cultivos y predicción del comportamiento del consumidor, son aspectos que se beneficiarán de la implementación de los SSD basados en IA. Estos avances promueven una agricultura más resiliente y adaptada a los desafíos del cambio climático y el crecimiento poblacional.

Sin embargo, se reconoce la necesidad de una distribución más uniforme de la investigación a lo largo de la AVC, y se recomienda que estudios futuros se centren en las etapas de procesamiento y consumo. El análisis geográfico revela que países como China, Estados Unidos, India, Irán y Francia lideran la producción de investigación, resaltando el valor de la colaboración transnacional en la evolución de la IA en la agricultura.

Finalmente, el presente estudio muestra evidencia del impacto positivo de la IA en la eficiencia operativa y la sostenibilidad agrícola. Así mismo destaca el papel importante de la colaboración internacional y la necesidad de una continua innovación tecnológica. A medida que avanzamos, es imperativo que el sector agrícola adopte estas tecnologías emergentes para enfrentar los desafíos actuales y futuros, asegurando una producción de alimentos sostenible y suficiente para satisfacer las necesidades de una población mundial en crecimiento.

Literatura citada

- Aria, M. y Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: una herramienta R para un análisis exhaustivo de mapeo científico. *Revista de Informetricia*, 11(4), 959-975.
- Bhagat, PR., Naz., F. y Magda, R. (2022). Soluciones de inteligencia artificial que permiten la agricultura sostenible: un análisis bibliométrico. *Más Uno*, 17(6), e0268989. DOI: 10.1371/journal.pone.0268989.
- Bhatt, R. y Kaur, A. (2019). Agricultura inteligente: sensores agrícolas inteligentes basados en IoT para monitorear la temperatura y la humedad en vivo utilizando Arduino, computación en la nube y tecnología solar. *La Revista Internacional de Ingeniería y Ciencia (IJES)*, 8(7), 49-55.
- Fernández-Alduenda, M., Pérez-Rodríguez, P. y Jiménez-Jiménez, F. (2022). IoT e IA en la agricultura: una revisión sistemática. *Computación y Electrónica en Agricultura*. 184, 106065.
- Ganeshkumar, C., Jena, SK., Sivakumar, A. y Nambirajan, T. (2023). Inteligencia artificial en la cadena de valor agrícola: revisión y direcciones futuras. *Revista de agronegocios en economías emergentes y en desarrollo*, 13 (3), 379-398. DOI: 10.1108/JADEE-07-2020-0140.
- Jain, AK. y Gupta, M.M. (Eds.). (2021). *Aprendizaje profundo para la toma de decisiones en agricultura*. Naturaleza Springer.
- Khosla, R. y Fischer, M. (2020). *Agricultura de precisión para la sostenibilidad*. John Wiley e hijos.
- Liakos, KG., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S. y Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensores*, 18(8), 2674.
- Lobell, DB., Cassman, KG. y Field., CB (2013). Brechas en el rendimiento de los cultivos: su importancia, magnitudes y causas. *Revisión anual de medio ambiente y recursos*, 38, 179-204.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *Tecnología de la información y la comunicación (TIC) en la agricultura: informe para los diputados agrícolas del G20*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i7961e.pdf>.
- Perry, C. (2017). Riego eficiente; comunicación ineficiente; recomendaciones erróneas. *Riego y Drenaje*, 66(1), 175-182.
- Schimmelpfennig, D. (2016). Beneficios agrícolas y adopción de la agricultura de precisión. *Informe de Investigación Económica*. 1-27.
- Van Eck, N. y Waltman, L. (2010). Software de encuesta: VOSviewer, un programa informático de cartografía bibliométrica. *Cienciometría*, 84 (2), 523-538.