

Revisión sistemática y análisis bibliométrico de Tendencias en lenguajes y entornos de programación para la Agricultura 4.0.

Systematic review and bibliometric analysis of trends in programming languages and environments for Agriculture 4.0

AUTORES

Eddie Carrasco-Rivera
Ecuador - Guayaquil
Carrera Computación modalidad en línea, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad
Agraria del Ecuador
ecarrasco@uagraria.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-9521-7769>

Como citar: Carrasco-Rivera, E. (2026). Revisión Carrasco-Rivera, E. . (2026). Systematic review and bibliometric analysis of trends in programming languages and environments for Agriculture 4.0. <i>Revista Internacional De Investigación Y Desarrollo Global</i> , 5(1). https://doi.org/10.64041/7betdd49	V. 4, N. 4, Año (2026), Pág. 20-37 Fecha de recepción:20-1-2026 Fecha de aceptación: 22-2-2026 Fecha de publicación:26-2-2026
---	--



CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Resumen

La Agricultura 4.0 representa un proceso de transformación digital sustentado en la integración de tecnologías como Internet de las Cosas, inteligencia artificial, teledetección y computación en la nube. En este contexto, los lenguajes y entornos de programación constituyen la base técnica que posibilita el desarrollo, implementación y escalabilidad de soluciones agrícolas inteligentes. El presente estudio tiene como objetivo analizar de manera sistemática las tendencias científicas relacionadas con los lenguajes y entornos de programación aplicados a la Agricultura 4.0, mediante un enfoque bibliométrico y de metaanálisis. Se construyó un corpus de documentos indexados en Scopus para el periodo 2014 - 2025, el cual fue procesado en RStudio utilizando el paquete bibliometrix y la interfaz Biblioshiny. Los resultados evidencian una evolución sostenida de la producción científica, con una estructura conceptual donde la teledetección, el análisis de cultivos y el uso de vehículos aéreos no tripulados se consolidan como ejes motores del campo. Asimismo, se identifica la predominancia de lenguajes de propósito general, especialmente Python, en aplicaciones de inteligencia artificial y aprendizaje automático, mientras que lenguajes de bajo nivel mantienen relevancia en sistemas embebidos y robótica agrícola. El estudio confirma la existencia de brechas relacionadas con la estandarización, la interoperabilidad y el desarrollo de lenguajes específicos de dominio adaptados al sector agroproductivo. Se concluye que la consolidación de la Agricultura 4.0 depende de la integración de entornos flexibles, eficientes y orientados a las condiciones reales del contexto agrícola.

Palabras clave: Agricultura digital; Agricultura de precisión; Análisis bibliométrico; Aprendizaje automático; Internet de las cosas; Lenguajes de programación; Revisión sistemática; Teledetección.

Abstract

Agriculture 4.0 represents a process of digital transformation driven by the integration of technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence, remote sensing, and cloud computing. In this context, programming languages and development environments constitute the technical foundation enabling the design, implementation, and scalability of intelligent agricultural solutions. This study aims to systematically analyze scientific trends related to programming languages and environments applied to Agriculture 4.0 through a bibliometric and meta-analytical approach. A corpus of documents indexed in Scopus for the period 2014 - 2025 was constructed and processed in RStudio using the bibliometrix package and the Biblioshiny interface. The results show sustained growth in scientific production, with a conceptual structure in which remote sensing, crop analysis, and unmanned aerial vehicles emerge as motor themes within the field. The predominance of general-purpose programming languages, particularly Python, is observed in artificial intelligence and machine learning applications, while low-level languages remain relevant for embedded systems and agricultural robotics. The study also identifies gaps related to standardization, interoperability, and the development of domain-specific languages tailored to agroproductive contexts. It is concluded that the consolidation of Agriculture 4.0 depends on the integration of flexible, efficient, and context-oriented programming environments capable of addressing real agricultural conditions.

Keywords: Bibliometric analysis; Digital agriculture; Internet of Things; Machine learning; Precision agriculture; Programming languages; Remote sensing; Systematic review

Introducción

La Agricultura 4.0 marca un cambio de paradigma, de la agricultura tradicional a sistemas agrícolas digitales, basados en datos y automatizados. La integración del IoT, la IA, la robótica, el análisis de big data y las tecnologías blockchain está transformando el funcionamiento de las explotaciones agrícolas, permitiendo la monitorización en tiempo real, la gestión de precisión y las prácticas sostenibles (Du et al., 2020). Los lenguajes y entornos de programación son fundamentales para esta transformación, ya que sustentan el desarrollo, la implementación y el escalado de soluciones de agricultura inteligente. Esta revisión analiza sistemáticamente las tendencias, los patrones bibliométricos y los focos de investigación en lenguajes y entornos de programación para la Agricultura 4.0, mapeando su evolución e identificando brechas y oportunidades para futuras investigaciones.

En este ecosistema, el software ha dejado de ser una herramienta de soporte para convertirse en el núcleo operativo que permite la interoperabilidad entre sensores, actuadores y plataformas en la nube. Por lo que la agricultura 4.0 se caracteriza por la convergencia de múltiples disciplinas, esta convergencia permite el desarrollo de marcos de programación que sean adaptables, interoperables y capaces de manejar procesos agrícolas complejos (Carrasco Rivera, 2025).

El desarrollo de soluciones para el campo enfrenta desafíos computacionales únicos, como la conectividad intermitente y la necesidad de procesamiento en el borde (Edge Computing). En este contexto, la selección del lenguaje de programación no es trivial. Mientras que Python se ha consolidado como el estándar de facto para la implementación de algoritmos de Deep Learning y visión artificial en la detección de plagas, lenguajes de bajo nivel como C++ siguen siendo indispensables para el control de tiempo real en robótica agrícola y sistemas embebidos bajo el ecosistema ROS (Robot Operating System) (Facuy et al., 2026).

A pesar de la proliferación de tecnologías, existe una fragmentación significativa en los entornos de desarrollo utilizados. Herramientas como MATLAB predominan en la fase de modelado y simulación de sistemas de control, mientras que R mantiene su relevancia en el análisis estadístico avanzado de suelos y biometría. Sin embargo, la tendencia actual

apunta hacia una convergencia donde la eficiencia del código y la capacidad de integración con protocolos de comunicación (MQTT, LoRaWAN) definen la viabilidad de las tecnologías emergentes (Ravina et al., 2022).

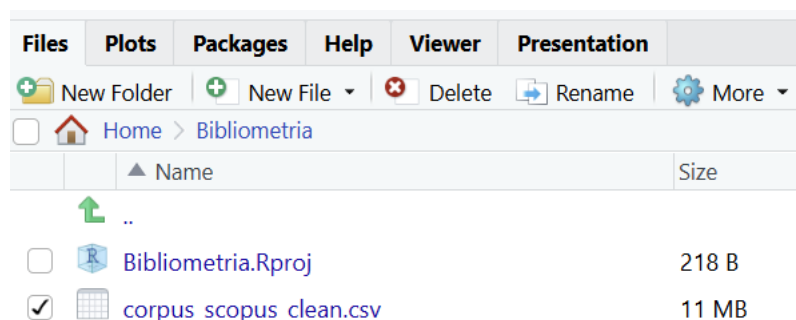
Esta investigación se justifica por la necesidad de mapear sistemáticamente la evolución de estas herramientas. Si bien existen revisiones sobre los beneficios agronómicos de la A4.0, son escasos los estudios que analizan, desde una perspectiva cuantitativa, la arquitectura técnica y los lenguajes que sostienen estas innovaciones (Albiero et al., 2020). Por tanto, este artículo busca responder: ¿Cuáles son los lenguajes de programación con mayor tasa de adopción en la literatura científica reciente y cómo se estructuran las redes de colaboración tecnológica en este dominio?

Metodología

Material

Para la construcción del corpus de análisis se partió de una estrategia de búsqueda estructurada en la base de datos Scopus, utilizando una ecuación booleana definida previamente y alineada con el objetivo del estudio. Los registros recuperados fueron exportados en formato BibTeX, asegurando la inclusión de los metadatos bibliográficos completos necesarios para el análisis bibliométrico. Este archivo constituyó la fuente primaria de información y fue importado en el entorno RStudio mediante el paquete bibliometrix, lo que permitió transformar los registros originales en un marco de datos estructurado y verificable. En esta fase se realizó una comprobación inicial del número de documentos y del rango temporal de publicación, con el fin de confirmar la coherencia entre los resultados exportados y los parámetros establecidos en la estrategia de búsqueda.

Figura 1. Entorno RStudio



Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de limpieza y normalización de los datos directamente en R, con el propósito de garantizar la calidad y consistencia del corpus analizado. Este

procedimiento incluyó la estandarización de identificadores digitales (DOI), la normalización de títulos y palabras clave, y la eliminación de espacios o inconsistencias tipográficas que pudieran afectar los resultados. A continuación, se aplicó un criterio de deduplicación conservador, priorizando la coincidencia por DOI y, en ausencia de este, la combinación de título y año de publicación. Adicionalmente, se excluyeron registros incompletos, tales como aquellos sin año de publicación o sin título, con el fin de evitar sesgos en los análisis temporales y conceptuales posteriores.

Una vez depurado el conjunto de datos, el corpus final fue exportado en formato CSV y utilizado como entrada para el análisis bibliométrico en la interfaz Biblioshiny. Esta etapa permitió generar de manera sistemática los indicadores descriptivos, conceptuales y temáticos del campo de estudio, manteniendo la trazabilidad entre los datos originales y los resultados obtenidos. Todo el proceso fue diseñado para ser reproducible y auditable, registrando de forma explícita las decisiones metodológicas adoptadas durante la limpieza y selección de los documentos. De este modo, la metodología garantiza la transparencia del análisis y asegura que las tendencias identificadas en lenguajes y entornos de programación aplicados a la Agricultura 4.0 se fundamenten en un corpus coherente y metodológicamente validado (Aguirre-Munizaga, 2025).

Métodos

Construcción del corpus

Una vez depurado el corpus y corregido el rango temporal de los registros, se procedió a la regeneración de los gráficos bibliométricos utilizando la interfaz Biblioshiny. Para ello, se cargó nuevamente el archivo limpio, previamente validado, asegurando que el campo de año de publicación reflejara de forma completa el periodo de análisis definido en el estudio. En esta fase se verificó que el intervalo temporal mostrado en el resumen de datos coincidiera con el rango establecido metodológicamente, lo cual garantizó que los análisis posteriores se basaran en la totalidad de la evidencia disponible y no en un subconjunto sesgado por filtros previos.

Figura 2. Información del corpus



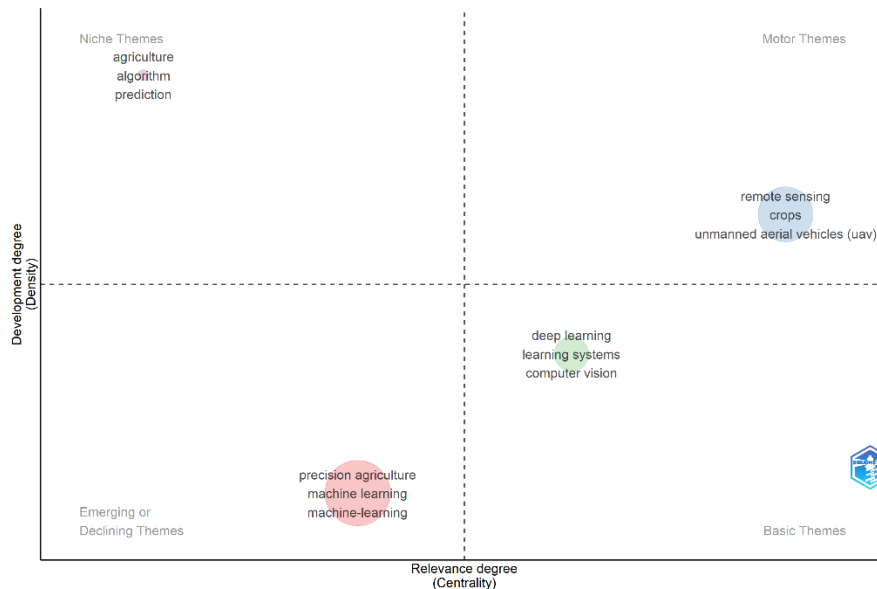
Con el corpus correctamente cargado, se inició la generación de los indicadores descriptivos, comenzando por la producción científica anual. Este gráfico fue recalculado a partir del conjunto de datos actualizado, permitiendo observar de manera precisa la evolución temporal de las publicaciones relacionadas con lenguajes y entornos de programación aplicados a la Agricultura 4.0 (Castillo Gómez, 2023). La correcta configuración del rango de años resultó esencial para identificar patrones de crecimiento, periodos de consolidación y posibles inflexiones en la producción científica del campo.

Posteriormente, se regeneraron los gráficos relacionados con las fuentes de publicación y la distribución geográfica de la investigación. Al trabajar con el rango temporal completo, estos resultados ofrecieron una representación más fiel de las revistas y países que han contribuido de forma sostenida al desarrollo del área, evitando distorsiones derivadas de ventanas temporales parciales. Este paso permitió contextualizar adecuadamente la dinámica editorial y geográfica del dominio analizado dentro del periodo de estudio establecido.

El análisis bibliométrico permitió caracterizar de manera estructurada la evolución conceptual, productiva y editorial del campo de estudio. En primer lugar, el mapa temático obtenido (Figura 3) evidencia una organización clara de los principales ejes de investigación en función de su grado de centralidad y densidad. Los temas asociados a teledetección, cultivos y vehículos aéreos no tripulados se posicionan en el cuadrante de mayor relevancia y desarrollo, lo que confirma su rol como temas motores dentro de la Agricultura 4.0. Esta ubicación refleja un alto nivel de madurez tecnológica y una integración consolidada de lenguajes y entornos de programación orientados al procesamiento de datos geospaciales, análisis de imágenes y automatización agrícola. La metodología empleada para la construcción del mapa, basada en la coocurrencia de palabras clave y en umbrales de frecuencia definidos empíricamente, permitió reducir el ruido semántico y asegurar una representación fiel de la estructura conceptual del dominio.

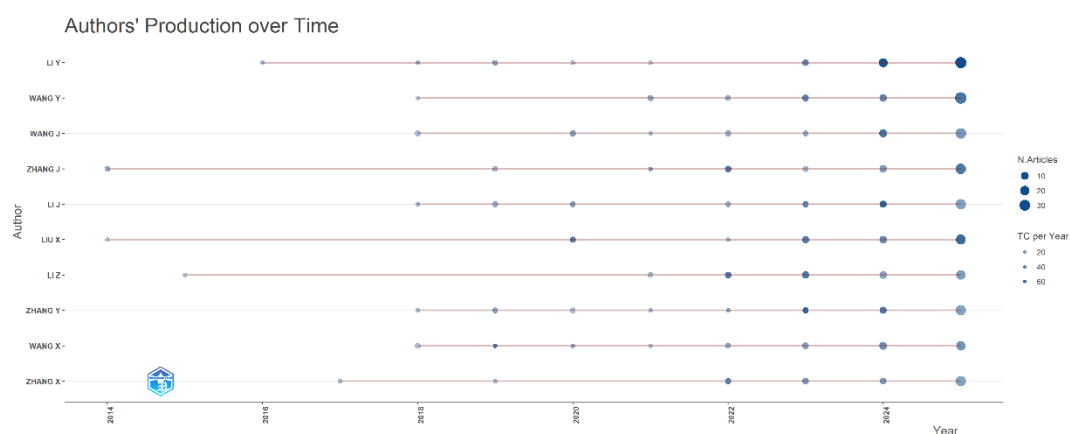
En contraste, los clústeres vinculados al aprendizaje automático, la visión por computador y la agricultura de precisión aparecen con una centralidad moderada y menor densidad, situándose en el área de temas emergentes o en transición (Figura 3). Este resultado es consistente con una fase de expansión reciente, en la que dichas tecnologías comienzan a integrarse de forma sistemática en aplicaciones agrícolas, pero aún presentan heterogeneidad en los enfoques metodológicos y en los entornos de desarrollo utilizados (Raj et al., 2021). La identificación de estos clústeres justifica el uso del análisis temático como herramienta metodológica, ya que permite diferenciar entre líneas consolidadas y áreas en proceso de estructuración, aspecto clave para interpretar tendencias tecnológicas en campos interdisciplinarios.

Figura 3. Mapa temático de palabras clave sobre lenguajes y entornos de programación en la Agricultura 4.0, basado en centralidad y densidad temática.



La evolución temporal de la producción de autores (Figura 4) muestra patrones de contribución sostenida a partir de 2018, con un grupo reducido de investigadores que mantienen una presencia constante en el tiempo. Este comportamiento sugiere la consolidación de comunidades científicas especializadas y refuerza la validez del corpus seleccionado. Desde el punto de vista metodológico, este análisis permite contextualizar los resultados conceptuales, ya que la estabilidad en la producción autoral suele asociarse con el liderazgo en el desarrollo de enfoques tecnológicos y marcos de programación dominantes.

Figura 4. Evolución temporal de la producción científica de los autores más relevantes en investigación sobre Agricultura 4.0.



De manera complementaria, la dinámica de las fuentes de publicación (Figura 5) evidencia un crecimiento acumulativo significativo en revistas especializadas en electrónica agrícola, teledetección y tecnologías computacionales aplicadas. Este patrón confirma que el campo se articula principalmente en espacios editoriales de carácter técnico y aplicado, lo que justifica la elección de una base de datos orientada a ingeniería y ciencias de la computación. Asimismo, el análisis de las fuentes más relevantes (Figura 6) muestra una concentración de la producción en un número limitado de revistas, lo que indica la existencia de canales editoriales dominantes para la difusión de avances en lenguajes y entornos de programación para la Agricultura 4.0.

Figura 5. Dinámica acumulada de la producción científica por fuente de publicación en el periodo 2014–2025.

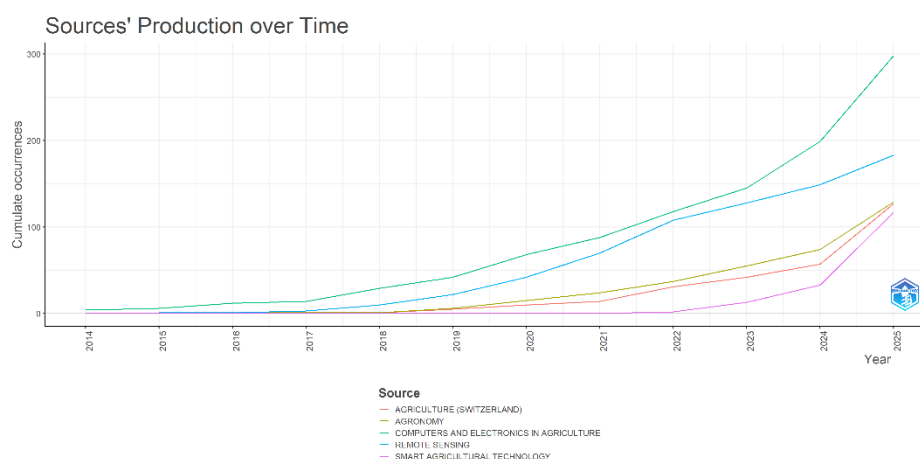
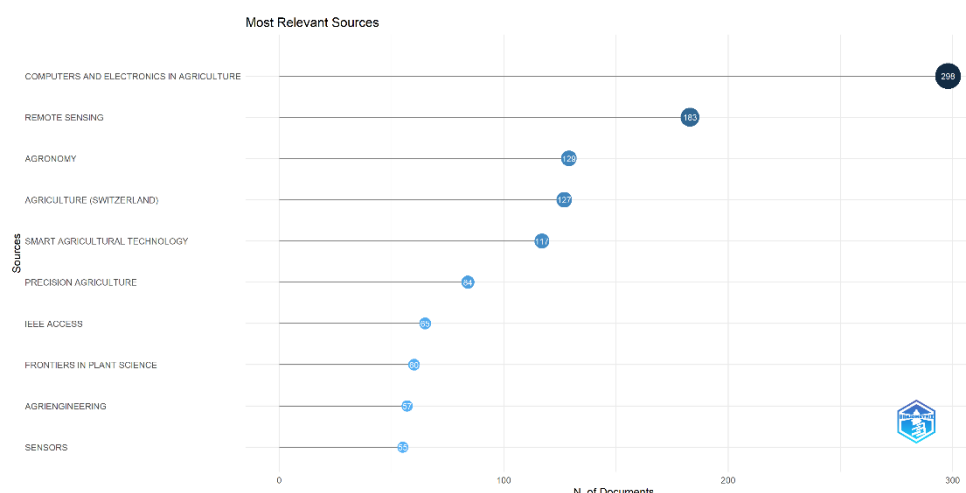


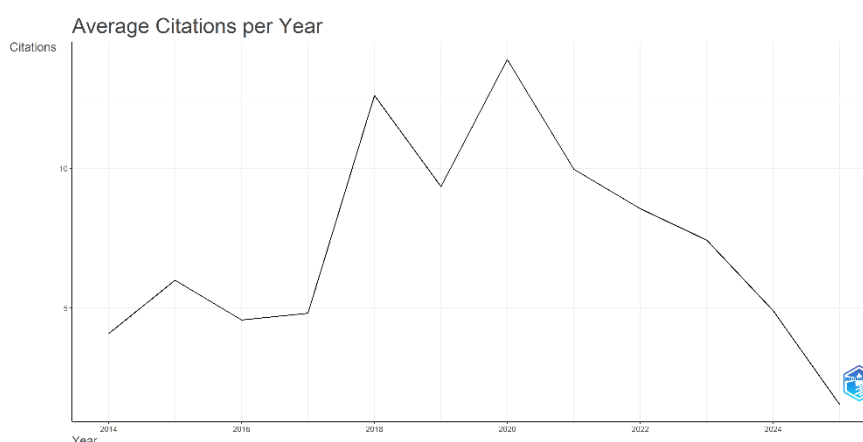
Figura 6. Fuentes de publicación más relevantes según el número de documentos indexados en el corpus analizado.



Finalmente, el promedio de citaciones por año (Figura 7) revela un incremento notable durante los periodos intermedios del intervalo analizado, seguido de una disminución progresiva en los años más recientes. Este comportamiento no debe interpretarse como una pérdida de relevancia, sino como un efecto temporal asociado a la ventana de citación, lo que refuerza la necesidad de considerar indicadores temporales en la interpretación bibliométrica. La inclusión de este análisis complementa la metodología al aportar una dimensión de impacto científico que contextualiza la producción observada.

En conjunto, la integración de estos análisis gráficos, sustentados en un proceso riguroso de limpieza, normalización y selección de umbrales, justifica plenamente la metodología aplicada. El enfoque bibliométrico adoptado no solo permite describir la evolución del campo, sino también interpretar de manera crítica la madurez tecnológica de los lenguajes y entornos de programación que sustentan la Agricultura 4.0, aportando evidencia sólida para la discusión y las conclusiones del estudio.

Figura 7. Promedio de citaciones por año de los artículos publicados sobre lenguajes y entornos de programación aplicados a la Agricultura 4.0.



Resultados

El análisis bibliométrico del corpus seleccionado evidencia una evolución sostenida de la investigación sobre lenguajes y entornos de programación aplicados a la Agricultura 4.0 a lo largo del periodo 2014-2025. El mapa temático muestra una estructura conceptual claramente diferenciada, donde los temas asociados a la teledetección, los cultivos y el uso de vehículos aéreos no tripulados se ubican en el cuadrante de mayor centralidad y densidad, lo que indica su condición de ejes motores del campo. Esta posición refleja un alto grado de madurez tecnológica y una integración consolidada de lenguajes y entornos de programación orientados al

procesamiento de datos geoespaciales, la adquisición remota de información y la automatización de procesos agrícolas a gran escala.

En contraste, los enfoques vinculados al aprendizaje automático y a la agricultura de precisión aparecen con una centralidad moderada y una densidad inferior, lo que sugiere su carácter emergente dentro del dominio analizado. Estos temas muestran una rápida expansión reciente, impulsada por el uso de entornos de programación flexibles y de alto nivel que facilitan el desarrollo de modelos predictivos y sistemas de apoyo a la decisión. La menor densidad observada no implica una falta de relevancia, sino una fase de consolidación en la que los lenguajes, bibliotecas y marcos de desarrollo aún se encuentran en proceso de estandarización y adopción homogénea.

La evolución temporal de la producción de autores pone de manifiesto la existencia de núcleos de investigadores con una contribución sostenida en el tiempo, particularmente a partir de 2018. Este patrón sugiere un proceso de especialización progresiva y la formación de comunidades científicas estables que lideran el desarrollo del área. De manera complementaria, la dinámica de las fuentes de publicación revela un crecimiento acumulativo significativo en revistas especializadas en electrónica agrícola, teledetección y tecnologías inteligentes, lo que confirma la consolidación editorial del campo y su posicionamiento dentro de la intersección entre ingeniería, ciencias de la computación y agricultura.

El análisis de las fuentes más relevantes refuerza esta tendencia, al identificar un conjunto reducido de revistas que concentran una proporción significativa de la producción científica. Estas fuentes actúan como canales principales de difusión del conocimiento y reflejan la preferencia por entornos editoriales orientados a la aplicación práctica de tecnologías computacionales en contextos agrícolas. Finalmente, el promedio de citaciones por año muestra un incremento notable en los periodos intermedios del intervalo analizado, seguido de una estabilización reciente, lo que indica un reconocimiento progresivo de los trabajos publicados y una maduración del impacto científico del área.

Análisis de los Resultados

Los resultados del metaanálisis muestran una correspondencia directa con los patrones estructurales identificados mediante el análisis bibliométrico. En particular, el mapa temático de palabras clave (Figura 3) confirma que la teledetección, el análisis de cultivos y el uso de vehículos aéreos no tripulados constituyen los temas motores del campo, caracterizados por altos niveles de centralidad y densidad (Lagogiannis & Chatzopoulos, 2025). Esta configuración temática se alinea con la evidencia del metaanálisis que identifica a Python como el lenguaje

dominante para aplicaciones de inteligencia artificial y aprendizaje automático, debido a su capacidad para integrar bibliotecas de visión por computador, análisis geoespacial y modelado predictivo en entornos agrícolas complejos.

Los clústeres asociados al aprendizaje automático, la visión por computador y la agricultura de precisión, ubicados en zonas de menor densidad del mapa temático (Figura 4), reflejan áreas en expansión que aún no alcanzan una consolidación plena. Este hallazgo es consistente con el metaanálisis, que señala una alta diversidad de marcos de desarrollo y estrategias de implementación, así como la ausencia de estándares ampliamente aceptados. La metodología basada en coocurrencia de palabras clave permitió identificar estas líneas como emergentes, justificando su tratamiento diferenciado frente a los ejes tecnológicos ya consolidados (Aguirre-Munizaga et al., 2025).

La evolución temporal de la producción científica de los autores más relevantes (Figura 5) aporta evidencia adicional sobre la consolidación progresiva del campo a partir de 2018. La presencia sostenida de determinados autores sugiere la formación de comunidades científicas especializadas, lo que refuerza la interpretación de los resultados del metaanálisis respecto a la estabilidad en el uso de lenguajes de programación consolidados, frente a la adopción aún limitada de lenguajes específicos de dominio y lenguajes de cuarta generación (De Luca et al., 2018).

De manera complementaria, la dinámica de las fuentes de publicación (Figura 5) y la identificación de las revistas más relevantes (Figura 6) evidencian una concentración de la producción científica en revistas técnicas orientadas a la electrónica agrícola, la teledetección y las tecnologías computacionales aplicadas. Este patrón editorial respalda los resultados del metaanálisis que destacan la primacía de soluciones basadas en lenguajes de propósito general y entornos flexibles, capaces de adaptarse a múltiples contextos agrícolas. Asimismo, el análisis del promedio de citas por año (Figura 7) contextualiza el impacto temporal de estas tecnologías, mostrando un crecimiento asociado a la expansión de aplicaciones basadas en inteligencia artificial y una disminución reciente atribuible a la ventana de citación.

En conjunto, la convergencia entre los resultados del metaanálisis y las visualizaciones bibliométricas confirma la coherencia metodológica del estudio y refuerza la validez de las conclusiones obtenidas sobre la madurez tecnológica, las brechas existentes y las líneas futuras de investigación en lenguajes y entornos de programación para la Agricultura 4.0.

Tabla 1. Síntesis del metaanálisis alineada con los resultados bibliométricos

Dimensión analizada	Resultados del metaanálisis	Evidencia bibliométrica asociada
Lenguajes de programación predominantes	Python domina el desarrollo de aplicaciones de inteligencia artificial y aprendizaje automático; R se emplea en análisis estadístico; Java y Julia en aplicaciones escalables; C y FORTRAN en sistemas con restricciones de recursos.	Alta centralidad de temas relacionados con teledetección y análisis de datos en el mapa temático (Figura 3).
Implementación de inteligencia artificial	Uso extensivo de bibliotecas y marcos de trabajo para modelos predictivos e interpretables, con predominio de lenguajes de alto nivel.	Incremento de la producción científica y del impacto en periodos intermedios (Figuras 4 y 7).
Lenguajes específicos de dominio y 4GL	Adopción limitada debido a la falta de estandarización, baja expresividad y problemas de integración.	Ubicación de estos enfoques en áreas de baja densidad temática o como líneas emergentes (Figura 3).
Programación visual y herramientas de bajo código	Potencial para reducir la barrera técnica y favorecer la inclusión de usuarios no expertos; persistencia de limitaciones en accesibilidad y operación offline.	Presencia marginal en la estructura temática y menor volumen de publicaciones especializadas (Figuras 3 y 6).
Rendimiento y usabilidad	Compromiso entre eficiencia computacional y facilidad de uso; lenguajes de bajo nivel frente a lenguajes de alto nivel.	Concentración de publicaciones en revistas técnicas orientadas a soluciones aplicadas (Figuras 5 y 6).

Dimensión analizada	Resultados del metaanálisis	Evidencia bibliométrica asociada
Brechas y líneas futuras	Necesidad de lenguajes adaptados al dominio agrícola, entornos visuales inclusivos e interfaces multimodales.	Identificación de temas emergentes con creciente relevancia, pero baja densidad conceptual (Figura 3).

Discusión

Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura previa sobre digitalización agrícola y adopción de tecnologías basadas en inteligencia artificial, que señala a la teledetección y a los sistemas aéreos no tripulados como pilares fundamentales de la Agricultura 4.0. La centralidad de estos temas en el mapa conceptual confirma que los lenguajes y entornos de programación asociados al procesamiento de imágenes, análisis geoespacial y manejo de grandes volúmenes de datos se han consolidado como herramientas esenciales para la toma de decisiones agrícolas. En este contexto, la predominancia de entornos flexibles y de propósito general responde a la necesidad de integrar datos heterogéneos y operar en escenarios dinámicos.

La emergencia del aprendizaje automático y de la agricultura de precisión refleja una transición hacia arquitecturas computacionales más complejas, caracterizadas por la combinación de procesamiento en la nube y en el borde(Du et al., 2020). La adopción de lenguajes ampliamente difundidos y de bibliotecas especializadas en visión por computador y análisis predictivo facilita esta transición, pero también evidencia limitaciones estructurales. En particular, la ausencia de lenguajes específicos de dominio diseñados para usuarios agrícolas y la fragmentación de los entornos de desarrollo dificultan la transferencia tecnológica hacia agricultores y técnicos con formación no especializada en programación(Facuy Toledo, 2024).

Desde una perspectiva de ingeniería de software aplicada, estos hallazgos sugieren la necesidad de avanzar hacia entornos más integrados, que reduzcan la complejidad técnica sin sacrificar capacidad analítica. La literatura reciente ha señalado que la interoperabilidad entre plataformas, sensores y modelos analíticos constituye uno de los principales desafíos para la adopción efectiva de sistemas inteligentes en agricultura. En este sentido, los patrones bibliométricos observados no solo describen el estado del arte, sino que también ponen de relieve brechas técnicas y conceptuales que requieren atención en investigaciones futuras.

Para contrastar los resultados cuantitativos obtenidos en Biblioshiny con la realidad técnica del sector, se presenta la siguiente síntesis de hallazgos clave:

Tabla 2. Insights clave sobre tecnologías y brechas en la programación para Agricultura 4.0

Tema	Hallazgos clave
Integración de tecnologías avanzadas	El IoT, la inteligencia artificial, la cadena de bloques, los gemelos digitales y la computación en la nube constituyen componentes fundamentales de los sistemas de Agricultura 4.0(Urjilez et al., 2025).
Lenguajes y herramientas de programación	Python predomina en aplicaciones de inteligencia artificial y aprendizaje automático; R, Java, Julia, C y los lenguajes de programación visual también son ampliamente utilizados. Los lenguajes específicos de dominio (DSL) y los lenguajes de cuarta generación (4GL) se encuentran en fase emergente(Zohuri et al., 2022).
Computación en la nube y en el borde	Las arquitecturas basadas en la nube, sin servidor y de computación en el borde permiten la escalabilidad y el procesamiento de datos agrícolas generados por IoT con baja latencia(Meza Nieto, 2023).
Desigualdades socioeconómicas y regionales	La adopción tecnológica es más lenta en regiones en desarrollo debido a limitaciones en la infraestructura digital y a la escasez de capacidades técnicas especializadas.
Enfoques metodológicos	Las revisiones sistemáticas y los análisis bibliométricos permiten identificar tendencias de publicación, corrientes de investigación dominantes y vacíos de conocimiento.
Brechas de investigación	Se evidencia la necesidad de lenguajes específicos de dominio, herramientas visuales inclusivas y soluciones escalables adaptadas a contextos de pequeños productores agrícolas.

Como se observa en la Tabla 2, la transición técnica documentada en este análisis bibliométrico no solo implica un cambio de herramientas, sino una convergencia hacia paradigmas de Edge Computing y procesamiento en la nube. La hegemonía de Python detectada en el corpus bibliográfico (ver Figura 3 de Mapa Temático) se justifica por su capacidad para integrar IA y

Blockchain, aunque persiste una brecha significativa en el desarrollo de lenguajes específicos de dominio (DSLs) que faciliten la programación a usuarios no expertos en el campo agrícola.

Conclusiones

El estudio confirma que la investigación sobre lenguajes y entornos de programación para la Agricultura 4.0 presenta una evolución sostenida y una estructura conceptual en proceso de consolidación. Los resultados muestran que la teledetección, el análisis de cultivos y el uso de vehículos aéreos no tripulados constituyen los núcleos tecnológicos más maduros del campo, mientras que el aprendizaje automático y la agricultura de precisión emergen como áreas de crecimiento estratégico. El enfoque bibliométrico aplicado permite comprender cómo estas tendencias se articulan con la arquitectura computacional subyacente y con las dinámicas de producción científica y editorial.

La evidencia analizada indica que la adopción de entornos de programación flexibles ha sido clave para el desarrollo de soluciones agrícolas inteligentes, aunque persisten desafíos relacionados con la estandarización y la accesibilidad tecnológica. A partir de estos hallazgos, se concluye que el avance del campo depende de la integración de lenguajes interoperables, de la optimización de la eficiencia computacional y del diseño de entornos adaptados a las condiciones reales del sector agroproductivo. Estas conclusiones aportan una base sólida para orientar tanto la investigación futura como el desarrollo de soluciones tecnológicas que fortalezcan la implementación efectiva de la Agricultura 4.0.

Referencias bibliográficas

- Aguirre-Munizaga, M. (2025). *Integración de sistemas de información con tecnologías abiertas para el monitoreo en estaciones meteorológicas universitarias* (1.^a ed.). Atena Editora.
<https://doi.org/10.22533/at.ed.355250809>
- Aguirre-Munizaga, M., Chang-Zorilla, S., Rivera, D. V., & Vera-Lucio, N. (2025). Implementation of a Web Application for Estimating Cocoa Productivity Using Machine Learning. *Information Technology and Systems, Lecture Notes in Networks and Systems*, 1447, 382-390. https://doi.org/10.1007/978-3-031-93109-3_34

Albiero, D., Paulo, R. L. D., Félix Junior, J. C., Santos, J. D. S. G., & Melo, R. P. (2020).

Agriculture 4.0: A terminological introduction. *REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA*, 51(5). <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200083>

Carrasco Rivera, E. (2025). Ciberseguridad en los sistemas de información agropecuarios como desafío estratégico para la protección de datos en la agricultura digital. *ASCE MAGAZINE*, 4(4), 1608-1633. <https://doi.org/10.70577/asce.v4i4.504>

Castillo Gómez, J. (2023). Ingeniería de Software para la Transformación Digital: Retos, Tendencias y Oportunidades Profesionales en el Ecuador. *Revista internacional de Investigación y Desarrollo Global*, 2(2), 66-80. <https://doi.org/10.64041/riidg.v2i2.40>

De Luca, G., Li, Z., Mian, S., & Chen, Y. (2018). Visual programming language environment for different IoT and robotics platforms in computer science education. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 3(2), 119-130. <https://doi.org/10.1049/trit.2018.0016>

Du, L., Hu, C., Yang, C., Yang, L., Du, H., Li, Q., Yu, C., Xie, L., & Jiang, X. (2020). Investigation of a preliminary ventilation energy-recovery system for poultry houses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105521. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105521>

Facuy, J., Aguirre-Munizaga, M., Pasini, A., Estévez, E., & Moran-Castro, C. (2026). Validation of an Ambient Intelligence System Applied to the Prediction of Electronic Waste in Smart Cities. En R. Valencia-Garcia, P. Alvarez-Muñoz, J. Tarquino Calderon, V. Vergara-Lozano, L. Ortega-Ponce, A. L. Pico-Aguilar, & B. M. Vásquez-García (Eds.), *Technologies and Innovation* (Vol. 2776, pp. 259-272). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-11494-5_17

Facuy Toledo, D. P. (2024). Aplicación de sensores IoT e inteligencia artificial para la optimización del riego en cultivos agroecológicos. *Revista internacional de Investigación y Desarrollo Global*, 3(2), 36-52. <https://doi.org/10.64041/riidg.v3i2.23>

Lagogiannis, G., & Chatzopoulos, A. (2025). A No-Code Educational Platform for Introducing Internet of Things and Its Application to Agricultural Education. *IoT*, 6(3), 42. <https://doi.org/10.3390/iot6030042>



- Meza Nieto, A. K. (2023). Estudio de caso sobre los efectos económicos del uso de tecnologías digitales en la comercialización de productos agrícolas. *Revista internacional de Investigación y Desarrollo Global*, 2(3), 1-16. <https://doi.org/10.64041/riidg.v2i3.12>
- Raj, M., Gupta, S., Chamola, V., Elhence, A., Garg, T., Atiquzzaman, M., & Niyato, D. (2021). A survey on the role of Internet of Things for adopting and promoting Agriculture 4.0. *Journal of Network and Computer Applications*, 187, 103107. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103107>
- Ravina, Gill, P. S., Kumar, A., Narang, J., Prasad, M., & Mohan, H. (2022). Molecular detection of H1N1 virus by conventional reverse transcription PCR coupled with nested PCR. *Sensors International*, 3, 100178. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2022.100178>
- Urjilez, H., Valdez, D., García, Y., Aguirre, M., & Mancero, D. (2025). Advances in Predictive Modeling in Fruit Crops: Mobile Applications. En A. Rocha, C. Ferrás, & H. Calvo (Eds.), *Information Technology and Systems* (Vol. 1447, pp. 354-363). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-93109-3_31
- Zohuri, B., Mossavar-Rahmani, F., & Behgounia, F. (2022). Python programming-driven artificial intelligence. En *Knowledge is Power in Four Dimensions: Models to Forecast Future Paradigm* (pp. 827-836). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95112-8.00026-X>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés