

Revisión Sistemática Y Análisis De Contenido Web De La Agricultura 4.0 Para El
Mejoramiento Del Sector Cafetero Con Énfasis En Los Pequeños Productores

Diana Isabella Rodríguez Quintero

Trabajo de Grado para Optar por el título de Ingeniero Industrial

Director

Jose Alonso Caballero Márquez

Magister en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2025

Índice de Contenido

Introducción	10
1. Planteamiento del problema.....	12
2. Objetivos.....	14
2.1. Objetivo General.....	14
2.2. Objetivos Específicos	14
2.3. Tabla de Cumplimiento de Objetivos.....	15
3. Marco de Referencia	15
3.1. Estado Actual del Sector.....	15
3.2. Marco de Antecedentes	18
8.1.1. Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores (Tovar-Quiroz, 2023).....	18
8.1.2. Implicaciones de la agricultura digital para pequeños productores: Evidencia desde Colombia (Melo-Velasco, J. 2023).....	20
8.1.3. Agricultura Colombiana: Aproximación A La Agricultura 4.0 (Rodríguez Molano et al. 2022)	21
3.3. Marco Teórico	23
3.3.1. Agricultura 4.0 y su impacto en la modernización agrícola	23
3.3.2. El cultivo de café y su digitalización en Colombia	24
3.3.3. La revisión de literatura y análisis de contenido web.....	25

4.	Metodología	26
4.1.	Revisión Sistemática de Literatura	26
4.2.	Análisis de Contenido Web	27
4.3.	Beneficios y Oportunidades de Mejora	28
4.4.	Guía Informativa.....	28
4.5.	Artículo Publicable	29
5.	Revisión Sistemática de Literatura	30
5.1.	Análisis Bibliométrico.....	30
5.2.	Análisis Preliminar de Literatura.....	38
5.2.1.	Innovaciones globales en Agricultura 4.0 para el sector cafetero	40
5.2.2.	La digitalización agrícola en el mundo: Perspectivas y desafíos	42
5.3.3.	Agricultura 4.0 en Colombia: Capacidades y adopción tecnológica en la caficultura	43
6.	Análisis de Contenido Web	45
7.	Resultados	49
7.1.	Contraste entre literatura y contenido web	49
7.2.	Beneficios de la digitalización de la caficultura.....	51
7.2.1.	Eficiencia	52
7.2.2.	Sostenibilidad	53
7.2.3.	Trazabilidad.....	54

7.2.4. Adaptabilidad.....	55
7.3. Oportunidades de mejora en la implementación de pequeños productores cafeteros	56
7.3.1. Conectividad.....	58
7.3.2. Educación	59
7.3.3. Políticas públicas y financiamiento	59
7.3.4. Colaboración.....	60
7.4. Guía informativa.....	61
8. Artículo Publicable	62
9. Conclusiones	62
10. Recomendaciones	64
Referencias	65

Índice de Figuras

Figura 1 Producción de artículos por ubicación en Scopus..... 31

Figura 2 Producción de artículos por año en Scopus y WOS 32

Figura 3 Producción de artículos por ubicación en WOS 33

Figura 4 Mapa de co-ocurrencia de palabras de WOS. Extraído de Vosviewer 34

Figura 5 Mapa de co-ocurrencia de palabras de Scopus. Extraído de Vosviewer 35

Figura 6 Mapa de co-autoría de WOS. Extraído de Vosviewer 37

Figura 7 Mapa de co-autoría de Scopus. Extraído de Voviewer..... 37

Figura 8 Matriz de análisis de revisión de literatura 39

Figura 9 Matriz de análisis de contenido web..... 46

Figura 10 Gráfico de beneficios 51

Figura 11 Gráfico de oportunidades mejora..... 57

Índice de Tablas

Tabla 1 Cumplimiento de Objetivos	15
Tabla 2 Matriz comparativa entre análisis	50

Índice de Apéndices

Apéndice A. Guía Informativa

Apéndice B. Artículo

Apéndice C. Matrices de Análisis

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS

Resumen

Título: Revisión sistemática y análisis de contenido web de la agricultura 4.0 para el mejoramiento del sector cafetero con énfasis en los pequeños productores.*

Autor: Diana Isabella Rodríguez Quintero**

Palabras clave: Agricultura 4.0, Revisión sistemática, Cadena de suministro, Café, Agricultura de precisión, Pequeños productores.

Descripción: La agricultura 4.0 es un conjunto de tecnologías digitales avanzadas que incluye herramientas como Internet de las Cosas (IoT), Big Data, Inteligencia Artificial (IA) y sensores inteligentes. El término surgió derivado de la Industria 4.0 y es una evolución de la agricultura de precisión; su objetivo principal es mejorar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de las producciones agrícolas, mediante una gestión más precisa y oportuna basada en datos en tiempo real. Para el sector cafetero colombiano, estas tecnologías se encuentran en una fase de implementación muy reciente, por lo que existe la necesidad latente de dar a conocer los beneficios y desafíos que pueden enfrentar los productores al momento de realizar una transición hacia la digitalización agrícola. A través de una revisión de literatura y un análisis de contenido web, este trabajo explora las ventajas que la agricultura 4.0 puede brindar a los pequeños productores de café, destacando cómo su implementación ha mostrado resultados positivos en diversos estudios, en términos de productividad, trazabilidad y calidad del producto. Así mismo, se identifican las barreras que enfrentan los caficultores con la adopción de estas tecnologías, como la falta de infraestructura para la conectividad, capacitación limitada en el uso de las herramientas y escasez de apoyo gubernamental e institucional, que facilite la adquisición y financiamiento para los productores con pequeñas y medianas extensiones cultivadas. Como resultado, en una guía informativa se sintetizan los hallazgos de la investigación y se concluye a partir de ellos, generando el contenido para un artículo de carácter publicable y su difusión.

*Trabajo de grado: Universidad Industrial de Santander.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: José Alonso Caballero Márquez. Bucaramanga, 2025.

Abstract

Title: Revisión sistemática y análisis de contenido web de la agricultura 4.0 para el mejoramiento del sector cafetero con énfasis en los pequeños productores..*

Author: Diana Isabella Rodríguez Quintero**

Key Words: Agriculture 4.0, Systematic review, Supply chain, Coffee, Precision agriculture, Smallholder farmers.

Description: Agriculture 4.0 is a set of advanced digital technologies that includes tools such as the Internet of Things (IoT), Big Data, Artificial Intelligence (AI), and smart sensors. The term emerged from Industry 4.0 and is an evolution of precision agriculture. Its main objective is to improve the efficiency, sustainability, and competitiveness of agricultural production through more precise and timely management based on real-time data. For the Colombian coffee sector, these technologies are in the early stages of implementation, making it crucial to raise awareness of the benefits and challenges producers may face when transitioning to digital agriculture. Through a systematic review of literature and web content analysis, this research explores the advantages that Agriculture 4.0 can offer small coffee producers, highlighting how its implementation has shown positive results in various studies, in terms of productivity, traceability, and product quality. Additionally, it identifies the barriers that coffee growers face in adopting these technologies, such as the lack of infrastructure for connectivity, limited training in the use of tools, and insufficient governmental and institutional support to facilitate access to financing for producers with small to medium-sized farms. As a result, an informational guide synthesizes the findings of the research, which are then used to develop content for a publishable article and its dissemination.

*Bachelor Thesis: Industrial University of Santander.

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Director: José Alonso Caballero Márquez. Bucaramanga, 2025.

Introducción

El sector agropecuario en Colombia es un pilar fundamental del país que tiene impacto significativo en la economía, el empleo, la seguridad alimentaria y el medio ambiente. Dentro de este sector, la caficultura ocupa un lugar representativo por el reconocimiento que genera a nivel mundial, derivado del café de alta calidad que se produce y se exporta. Además, el entorno ha sido muy positivo en el último año, rompiendo el récord de producción con un aumento del 24% comparado con la producción del 2023. Esto a su vez, se ve reflejado en las cifras del PIB, en las que este producto aporta casi un 23% del total del sector agropecuario (Agronegocios, 2024).

A pesar de su relevancia, la producción de este fruto enfrenta grandes desafíos en torno a las variables que impactan el precio y los resultados de la cosecha. Particularmente los pequeños productores deben lidiar con condiciones climáticas desfavorables, plagas, fluctuaciones en los precios, escasez de mano de obra y labores que requieren un desgaste físico importante, derivado de la falta de incorporación de tecnologías en sus procesos. Ante este panorama, es de vital importancia explorar nuevas herramientas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector.

La agricultura 4.0 surge como una solución para estas problemáticas, basándose en el uso de tecnologías avanzadas como Inteligencia Artificial, Internet de las Cosas, Big Data, sensores y automatización (Liu et al., 2021). Sin embargo, la digitalización del agro se ve frenada debido a los altos costos de implementación, la dificultad de acceso a infraestructura apta y la escasa educación en su uso. En pequeños productores estas barreras son mucho más notorias y los procesos se siguen ejecutando de formas empíricas, sin acceso a datos precisos que les permitan tomar decisiones informadas y reducir la variabilidad por cambios climáticos o plagas.

Por esta razón, surge la necesidad de conocer el estado actual de la agricultura 4.0 en el cultivo de café, tanto a nivel nacional como internacional, identificando qué tecnologías se usan, su viabilidad y los obstáculos asociados a su adopción. Asimismo, se busca analizar qué oportunidades tienen los pequeños caficultores para poner en marcha la digitalización de sus cultivos y qué soluciones pueden facilitar su implementación en el país.

La modernización del sector cafetero mediante tecnologías de Agricultura 4.0 podría generar resultados positivos en términos de competitividad, rentabilidad y sostenibilidad, beneficiando a más de 500.000 familias caficultoras que dependen de esta actividad en el país (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo realizar una revisión de literatura y análisis de contenido web con el objetivo de conocer los beneficios del uso de la agricultura 4.0 para el mejoramiento del cultivo de café en pequeños productores. Esta se compone de: (i) Planteamiento del problema detectado (ii) Objetivos propuestos (iii) Marco de referencia del tema a tratar (iv) Metodología (v) Revisión de literatura y análisis de contenido web (vi) Resultados (vii) Artículo publicable (viii) Conclusiones y (ix) Recomendaciones.

1. Planteamiento del problema

La industria 4.0 ha representado un cambio radical en la forma como se realizan las labores en los diferentes sectores productivos. Con la introducción de tecnologías como Internet de las Cosas, Big Data, Blockchain, Inteligencia Artificial y Robótica, las empresas han podido digitalizar sus procesos, generando un impacto positivo en todas las áreas, desde los modelos de negocio hasta las interacciones entre proveedores y clientes.

El caso de la industria del agro no es ajeno a estos avances, pues hoy en día se requiere con urgencia el aumento de la producción de alimentos, pero sin generar grandes impactos ambientales (Lioutas, Charatsari, & de Rosa, 2021), por lo que, la transformación digital de este sector se presenta cada vez más como una solución prometedora para un conjunto amplio de problemas sociales.

El término agricultura 4.0 (A4.0) es un concepto que surge a partir de la cuarta revolución industrial y es una evolución de la agricultura de precisión (AP), ya que abarca un conjunto más amplio de tecnologías y transformaciones, mientras que la AP se enfoca en tecnologías particulares como sensores, drones, GPS, fotogrametría, geolocalización y software para monitorear datos.

La integración de la Industria 4.0 y el agro ofrece la posibilidad de digitalizar y automatizar la agricultura, es decir, convertirla en A4.0. De esta forma, se obtiene un ecosistema de agricultura industrial con monitoreo en tiempo real, basado en automatización y con una toma de decisiones inteligentes enfocadas en los datos obtenidos, lo cual, a su vez, genera una mejora significativa en la productividad, eficiencia de los cultivos y uso de los recursos naturales (Liu, Ma, Shu, Hancke, y Abu-Mahfouz, 2021).

A pesar de la amplia variedad de soluciones tecnológicas que se encuentran hoy en día, el desarrollo de la agricultura en Latinoamérica se encuentra rezagado debido al bajo número de investigaciones que se realizan sobre el tema. Según un análisis realizado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), en América Latina se realizan menos investigaciones en el sector agro, a comparación de otras regiones, debido a una menor inversión por parte de los países (Jose, 2014). En consecuencia, la adopción de estas tecnologías está aún más distante del alcance de los pequeños productores, quienes aportan un alto porcentaje de los cultivos a nivel mundial y, sin embargo, su adopción tecnológica se ve influida de manera negativa por variables en su percepción personal como la innecesaridad por el reducido tamaño de la propiedad, los bajos ingresos, la escasez de información y la dificultad de uso (Sott et al., 2020). Es por ello, que la A4.0 tampoco se ha aprovechado al máximo en Colombia, ya que los productores la consideran solamente como un alto costo sin mayores retribuciones.

La aplicabilidad de la A4.0 no tiene barreras que dificulten su gestión entre un cultivo y otro. Además, en una producción como la del café, que se da en más de 70 países, en su mayoría en desarrollo como Colombia (Sott et al., 2020), se hace indispensable adoptar sistemas que permitan competir y optimizar la cadena de suministro en su totalidad. Es por este motivo que actualmente la federación nacional de cafeteros se encuentra implementando una práctica de AP como es la georreferenciación de lotes cafeteros con el fin de que se pueda seguir accediendo al mercado europeo (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2024). Es por este motivo, que actualmente la federación nacional de cafeteros se encuentra implementando una práctica de AP como es la georreferenciación de lotes cafeteros con el fin de que se pueda seguir accediendo al mercado europeo (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2024).

Siendo el café uno de los productos que más le genera reconocimiento a Colombia y el commodity más comercializado en el mundo (Sott et al., 2020), la A4.0 en la caficultura representa técnicas y tecnologías dispuestas para gestionar toda la cadena de valor del cultivo, contribuyendo especialmente a la agricultura familiar que representa actualmente un 97% del total de las familias cafeteras en Colombia (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2024).

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Establecer los beneficios del uso de la agricultura 4.0 para el mejoramiento del cultivo de café, a través de una revisión sistemática y un análisis de contenido web.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión sistemática de la literatura científica sobre la agricultura 4.0 y su aplicabilidad en el sector cafetero, con especial énfasis en los pequeños productores.
- Realizar un análisis de contenido web sobre la implementación de tecnologías de agricultura 4.0 para el mejoramiento del cultivo de café en el contexto de los pequeños productores.
- Identificar los principales beneficios y oportunidades de mejora relacionados con la adopción de la agricultura 4.0 en pequeños productores cafeteros.

- Elaborar una guía sobre los beneficios de la agricultura 4.0 para el mejoramiento del sector cafetero, enfocada en las necesidades y desafíos de los pequeños productores.
- Elaborar un artículo de carácter publicable que sintetice los principales resultados de la investigación desarrollada en el sector cafetero.

2.3. Tabla de Cumplimiento de Objetivos

Tabla 1

Cumplimiento de Objetivos

OBJETIVO	CUMPLIMIENTO
Objetivo Específico 1	Capítulo 5
Objetivo Específico 2	Capítulo 6
Objetivo Específico 3	Capítulo 7
Objetivo Específico 4	Apéndice A
Objetivo Específico 5	Apéndice B

3. Marco de Referencia

3.1. Estado Actual del Sector

El sector agropecuario ha venido enfrentando grandes desafíos en el mundo debido a la falta de implementación de tecnologías que faciliten la realización de los procesos que implican gran desgaste físico y repetitividad por parte de los trabajadores del campo. Esta problemática cobra mayor relevancia cuando se concientiza acerca de la importancia del sector para garantizar la seguridad alimentaria, que según la ONU (2023), el panorama no es positivo, pues para 2030 se

pronostica que más de 600 millones de personas no contarán con el acceso a alimentos, afectados por las guerras, el cambio climático y las crisis económicas (Naciones Unidas, 2023).

Para lograr que este sector sea tan productivo como es necesario para abastecer la demanda mundial, es imprescindible buscar alternativas que no sólo mejoren la eficiencia de los terrenos cultivados, sino también la de las labores que se llevan a cabo en ellos. Es aquí donde la tecnología impacta significativamente y en países como Brasil, Argentina y Chile, la digitalización del agro se encuentra en una etapa avanzada, pero, por otra parte, algunas naciones enfrentan barreras en infraestructura y financiamiento, lo que dificulta la transformación en sus campos (Perez-Silva, R., & Campos, J. 2021)

En Colombia, el agro sigue siendo un pilar fundamental de la economía, representando una parte significativa del Producto Interno Bruto (PIB). En 2024, la economía del país creció un 1.7%, impulsada principalmente por la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, aportando un 8.1% al crecimiento del valor agregado en el año (Forbes, 2025).

Según un informe de la Universidad EAFIT (2020), la falta de inversión en tecnología para la agricultura dificulta el uso de herramientas avanzadas en pequeñas y medianas explotaciones, lo que repercute directamente en el desempeño del sector. Sin embargo, a nivel gubernamental se ha intentado desarrollar iniciativas para promover la adquisición de drones, sensores IoT y modelos de predicción basados en IA, con el objetivo de influir en la mejora y competitividad de las producciones (Giraldo, A. 2020).

En Colombia, el agro sigue siendo un pilar fundamental de la economía, representando una parte significativa del Producto Interno Bruto (PIB). En 2024, la economía del país creció un

1.7%, impulsada principalmente por la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, aportando un 8.1% al crecimiento del valor agregado en el año (Forbes, 2025).

Según el director de investigaciones económicas de la Federación Nacional de Cafeteros, actualmente 557.000 familias dependen del cultivo de café y la mayor parte proviene de una nueva zona cafetera en los departamentos de Cauca, Huila, Tolima y Nariño, relegando al segundo lugar al tradicional eje cafetero compuesto por Antioquia, Caldas, Risaralda, Quindío y Valle (Leibovich. J, 2025). Así mismo, la Fedecafeteros (2025) reportó un incremento histórico en la producción de sacos de café en el último trimestre del año 2024 y lo que va de corrido del 2025, alcanzando el nivel más alto en 29 años. El impacto de estos resultados también se vio reflejado en el valor de la cosecha, que presentó un crecimiento del 86% en el periodo de marzo del 2024 a febrero del 2025; esto refleja una recuperación del sector, un mayor aprovechamiento de las oportunidades de exportación y una mejora económica para los caficultores de 610 municipios y sus veredas, según afirma el gerente de la Federación Nacional de Cafeteros, Germán Bahamón (La República, 2025).

A pesar de estos avances en la productividad y competitividad del café, persisten desafíos como la volatilidad de los precios, los efectos de las fluctuaciones en el clima y la falta de acceso a recursos para la modernización de los cultivos de pequeños productores. Además, se ha señalado que para que una familia cafetera pueda garantizar su subsistencia, necesita al menos 3 hectáreas de cultivo, una meta que muchos productores aún no alcanzan (Giraldo. A, 2020).

Para orientar el país hacia la digitalización del agro, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (2023) ha mencionado que existen ejes primordiales en lo que se debe trabajar, como la conectividad, la educación, la sostenibilidad, la innovación pública, los

datos, el IoT y la IA. Se debe tener en cuenta que pocos cafeteros cuentan con grandes extensiones de tierra para cultivar, lo que limita su producción; además, gran parte de la mano de obra del sector no está formalizada, lo que genera inestabilidad económica para los trabajadores que aún cuentan con entusiasmo por realizar las labores del campo (Leibovich. J, 2025). Precisamente, la motivación por quedarse en las zonas rurales y emprender con negocios agropecuarios ha venido disminuyendo y la manera de contener este efecto es por medio de la digitalización, que aún se encuentra fuera del alcance de los pequeños productores.

3.2. Marco de Antecedentes

En la búsqueda de estudios y avances relacionados con la conceptualización y aplicabilidad de la agricultura 4.0 en cultivos cafeteros de pequeños productores, se prosigue con el análisis de trabajos de grado de pregrado encaminados a investigar la temática en cuestión, con el fin de abordar perspectivas no tratadas anteriormente y/o complementarias.

3.2.1. Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores (Tovar-Quiroz, 2023)

Mediante una revisión de más de 64 documentos científicos enfocados en las tecnologías que componen la agricultura 4.0, la autora en este artículo se encarga de definir las, contextualizar sobre las particularidades del uso de cada una de ellas, sus beneficios y los desafíos a los que se enfrentan los productores, especialmente los de pequeña escala, al momento de implementarlas.

Con este objetivo, Tovar encuentra que las tendencias a nivel global en agricultura moderna son el internet de las cosas (IoT), analítica de datos y big data, machine learning (ML), inteligencia artificial (IA), blockchain, computación en la nube y robótica avanzada. Sin embargo, estos avances pertenecen en su mayoría a la A4.0, por lo que es importante tener en cuenta también aquellos que hacen parte de la agricultura de precisión, incluyendo sensores y vehículos aéreos no tripulados, cámaras térmicas, sistemas de información geográfica y edición de genes.

Con esta amplia variedad de tecnologías, se espera que los productores puedan disminuir la variabilidad de sus cultivos en temas como el manejo del agua, monitoreo de crecimiento y sanidad de la planta, manejo de agroquímicos, monitoreo del suelo, agricultura protegida y seguimiento del cultivo a lo largo de toda la cadena de producción.

Estos desarrollos impactan significativamente en las ventajas competitivas y el crecimiento económico de los productores, pero a pesar de sus beneficios, existen barreras de implementación relevantes como los altos costos de entrada, la brecha de educación en el manejo de tecnologías y la ausencia de incentivos para la innovación agrícola, lo que a su vez genera desmotivación por invertir.

A partir de la identificación de estos desafíos, Tovar propone algunas soluciones que pueden contemplar los pequeños productores para traer a sus fincas la agricultura 4.0. Dentro de estas se mencionan la ejecución de actividades de forma conjunta, mediante la adquisición y uso de la maquinaria y herramientas tecnológicas en comunidad, con el fin de distribuir los costos entre los interesados. Además, la capacitación y apoyo por parte de profesionales se considera indispensable para obtener los resultados deseados.

3.2.2. Implicaciones de la agricultura digital para pequeños productores: Evidencia desde Colombia (Melo-Velasco, J. 2023)

En medio de la amplia variedad de tecnologías que componen la agricultura moderna, es poca la investigación que se ha desarrollado para conocer las implicaciones tanto positivas como negativas de su implementación, por este motivo, la autora busca analizar mediante este trabajo, las consecuencias sociales, éticas y económicas que trae consigo la agricultura digital, con especial enfoque en los colombianos que producen a pequeña escala.

Los principales objetivos de estas tecnologías son mejorar la gestión de los recursos como el agua, la energía y los fertilizantes, reducir tanto el impacto ambiental como los costos de producción y permitir una toma de decisiones más consciente y oportuna. Sin embargo, la autora menciona que existen importantes dificultades de acceso, especialmente en los pequeños cultivadores, quienes carecen de recursos financieros, técnicos y educativos para hacer uso de estas herramientas en sus campos.

En el estudio se destaca que las tecnologías de la agricultura digital están diseñadas para grandes productores, quienes se encuentran en una posición más favorecedora debido a que la mayoría cuenta con los recursos necesarios, desde dinero hasta ubicación e instalaciones apropiadas. Esto incrementa las brechas existentes y fortalece la concentración del poder hacia una población particular, sumado a las dudas que surgen actualmente relacionadas con la privacidad de los datos.

Se menciona que las personas que promueven el uso de dichas herramientas no toman en consideración los riesgos e impactos negativos que se pueden dar, sólo dirigen su narrativa hacia

la agricultura digital como la mejor solución para enfrentar las problemáticas globales de escasez alimentaria y cambio climático.

A partir de este estudio, la autora considera esencial diseñar políticas públicas que garanticen el acceso a las herramientas y a la formación de los agricultores colombianos, motivando la cooperación y participación de todos los actores del sector agro en el país. La efectividad de dichas políticas depende directamente de la capacidad que tenga el gobierno para reducir la desigualdad rural actual y para incentivar un desarrollo sostenible a largo plazo.

3.2.3. Agricultura Colombiana: Aproximación A La Agricultura 4.0 (Rodríguez Molano et al. 2022)

La autora de este artículo considera que la agricultura colombiana aún se basa en prácticas muy tradicionales que llevan consigo baja productividad, uso ineficiente de los recursos, baja rentabilidad y, además, generan un mayor impacto ambiental. Esto debido a que se le da un manejo generalizado a los cultivos, reduciendo el potencial de estos y degradando las tierras.

La agricultura de precisión aparece como una solución a los desafíos de productores y del medio ambiente, ya que ayuda a combatir los desperdicios en fertilizantes y riego, que hacen parte de las principales causas de afectación a la naturaleza y los suelos. También aumenta la productividad tanto del cultivo como de los agricultores, permitiendo reducir el tiempo que ocupan en las labores del campo y tienen efecto directo en la disminución de los costos de producción.

Con el surgimiento de la agricultura 4.0, procesos como el monitoreo, rastreo e identificación de enfermedades en los cultivos se han facilitado, ya que esta ofrece análisis de

variabilidad de suelos, información geográfica e imágenes que permiten tomar decisiones consientes y a tiempo de acuerdo con el tipo de tecnología que se tenga.

Este es el caso de los drones, que son usados en su mayoría para cultivos de menor extensión y las imágenes satelitales para grandes extensiones. En el artículo se comenta que en Cundinamarca se realizó un estudio con drones para monitorear cultivos de papa y dio como resultado una reducción significativa en el trabajo y tiempo que les tomaba realizar todas las labores correspondientes, esto gracias a que dicha tecnología fue de gran ayuda para identificar fácilmente los problemas de las plantas y así, tomar medidas para intervenirlas correctamente.

De igual manera, se comenta que en el periodo de 2018 a 2020 se realizó la implementación de un proyecto de la FAC y Telefónica llamado Smart Agro 4.0, el cual consistió en el uso de sensores de agua, con el objetivo de monitorear y predecir variables agronómicas mediante un modelo matemático. Se puso en funcionamiento en cultivos de papa y café y el resultado fue satisfactorio pues se duplicó la producción en el año 2019, se redujeron los costos unitarios de producción en un 44% y mejoró notoriamente la calidad y el sistema de riego de los cultivos.

En México también se resalta un caso en el que se usó una plataforma llamada SGreenH-IoT, la cual mediante servicios en la nube y análisis de datos, generaba alertas sobre el estado del cultivo para tomar decisiones oportunas y realizaba una medición del flujo del material cosechado para calcular el rendimiento del cultivo y las zonas que necesitaban intervención.

El paso a la transformación de la agricultura en Colombia, según los autores, está condicionado a la asequibilidad a teléfonos inteligentes y a todos los equipos necesarios por parte de los productores, a la mejora de la infraestructura y conectividad en los campos y a las políticas y educación que se le pueda brindar a las personas que hacen del agro su sustento de vida.

3.3. Marco Teórico

3.3.1. Agricultura 4.0 y su impacto en la modernización agrícola

La agricultura 4.0 es la representación de la evolución del sector agrícola hacia procesos más eficientes, automatizados y basados en datos. Surge de la mano del concepto de Industria 4.0, integrando tecnologías como IoT, Big Data, Inteligencia Artificial y sensores inteligentes con el objetivo de mejorar la productividad y sostenibilidad de los cultivos (Liu et al., 2021). Estas innovaciones permiten a los productores tomar decisiones más conscientes, basadas en información en tiempo real, reduciendo el desperdicio de insumos y a la par también el impacto ambiental.

Las tecnologías que componen la agricultura 4.0 tienen una amplia variedad de aplicaciones en los campos; los sensores inteligentes y drones, por ejemplo, facilitan la detección temprana de plagas y enfermedades, permitiendo que puedan hacer una intervención pronta y precisa, reduciendo el uso inadecuado de agroquímicos. Por otra parte, investigadores de la Universidad Agrícola de Nanjing en China, afirman que el IoT permite la interconexión entre dispositivos para monitorear variables del suelo y del clima, mientras que la IA posibilita el análisis predictivo para mejorar la planificación agrícola. (Friha et al., 2021). En este contexto, la digitalización agrícola resulta indispensable para afrontar los retos del mundo actual, donde la creciente demanda de alimentos y la afectación ambiental está superando todos los niveles.

3.3.2. El cultivo de café y su digitalización en Colombia

El café es un pilar fundamental de la economía y la cultura colombiana, siendo uno de los productos más representativos del país en el mercado global. Colombia es el tercer mayor productor mundial de café, representando aproximadamente el 8% de la producción global, con un enfoque especial en variedades de alta calidad como *Coffea arabica* (Sott et al., 2020).

El gobierno colombiano, a través del Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (MinTIC), ha impulsado iniciativas para mejorar la productividad del sector mediante conectividad, alfabetización digital y tecnologías emergentes como la IA y el IoT. Durante el Congreso de la Federación Nacional de Cafeteros de 2023, el ministro TIC, Mauricio Lizcano, destacó la necesidad de incrementar la conectividad en zonas rurales, ya que actualmente solo el 32% de estas áreas tienen acceso a internet, por lo que el gobierno está buscando que los caficultores adopten herramientas digitales para mejorar su producción, predecir condiciones climáticas, optimizar la venta en línea y fortalecer la sostenibilidad del sector (MinTIC, 2023). Además del impulso gubernamental, la Federación Nacional de Cafeteros y la Universidad del Magdalena han establecido una alianza estratégica para la implementación de tecnologías 4.0 en la producción de café. Este esfuerzo incluye el uso de inteligencia artificial, robótica y análisis de datos para mejorar los procesos agrícolas y la calidad del producto final. La aplicación de IA permite a los productores predecir cambios climáticos, identificar plagas y enfermedades, optimizar el uso de recursos hídricos y mejorar la gestión de la cadena de suministro. Según la doctora Idanis Díaz Bolaño, especialista en Ciencias de la Computación, la digitalización del sector cafetero facilitará una producción más eficiente y sostenible, beneficiando directamente a los

pequeños productores y asegurando la competitividad del café colombiano en el mercado global (Unimagdalena, 2024).

3.3.3. La revisión de literatura y análisis de contenido web

La revisión sistemática de literatura es un método exhaustivo que permite analizar, sintetizar y organizar la información disponible sobre el tema que sea de interés. El objetivo de su realización es identificar patrones, tendencia y vacíos en el conocimiento existente, para fundamentar nuevos estudios. Según Denyer y Tranfield (2009), este proceso consta de cinco pasos fundamentales como son la formulación de la pregunta de investigación, la localización de estudios, la evaluación crítica, el análisis y síntesis de la evidencia y finalmente la presentación de los resultados. Esta metodología es adaptable a diversos campos, incluyendo la agricultura, debido a su capacidad para proporcionar evidencia confiable en múltiples contextos.

Paralelamente, el análisis de contenido web ha cobrado relevancia en las investigaciones donde el acceso a fuentes digitales facilita la recopilación de información valiosa sin necesidad de implementar encuestas y/o entrevistas tradicionales. Herring (2010) destaca que esta metodología permite evaluar tendencia y patrones de comportamiento mediante el estudio de datos de blogs, redes sociales, wikis y otros medios digitales. Autores como Singh y Baack (2004) resaltan que se debe seguir un procedimiento estructurado para el éxito de la investigación, incluyendo selección de muestras, definición de categorías y verificación de la confiabilidad del proceso de codificación.

4. Metodología

Este estudio se desarrollará mediante una revisión sistemática de literatura y un análisis de contenido web. La metodología se estructura en las siguientes fases:

4.1. Revisión Sistemática de Literatura

La revisión sistemática de la literatura es un componente esencial para la investigación; su importancia radica en que no sólo se limita a una búsqueda bibliográfica, sino que sigue un proceso estructurado y transparente que garantiza que la información recopilada sea relevante, actual y de alta calidad.

Esta fase tiene como objetivo recopilar, analizar y sintetizar la información científica existente sobre la aplicación de la agricultura 4.0 en el sector cafetero. Para ello, inicialmente se definen los criterios de búsqueda mediante palabras clave relacionadas con el tema de interés, esto con el fin de garantizar que los artículos que arroje la búsqueda aborden las tecnologías y prácticas más relevantes. Se seleccionan las bases de datos de Scopus y Web of Science para obtener la literatura académica relevante y de alta calidad. El filtrado y selección de artículos se aplica con criterios de inclusión y exclusión como relevancia, actualidad y calidad de las publicaciones.

Los datos obtenidos se organizan en función de las tecnologías utilizadas en la Agricultura 4.0, los beneficios reportados para los pequeños productores de café y los desafíos identificados en la implementación. Los hallazgos se caracterizan según su aplicabilidad en pequeños productores y su impacto en la eficiencia productiva y sostenibilidad del cultivo de café.

El estado del arte resultante de la revisión sistemática actúa como base para la elaboración de las conclusiones y recomendaciones de la investigación. Además, constituye una referencia clave para investigadores futuros, ya que resalta las brechas existentes en el conocimiento y señala las áreas que aún requieren más investigación. En el contexto de la Agricultura 4.0, donde las tecnologías están en constante evolución, la revisión sistemática juega un papel esencial en orientar futuras investigaciones y en mejorar la comprensión de los efectos de estas tecnologías en el sector agrícola, particularmente en el cultivo de café.

4.2. Análisis de Contenido Web

El análisis de contenido web constituye una fase complementaria a la revisión sistemática de la literatura, en la cual se examinan fuentes digitales relacionadas con la implementación de tecnologías de la Agricultura 4.0 en el sector cafetero. Dado que la información disponible en línea varía en calidad y relevancia, este análisis se realiza mediante un enfoque meticuloso para asegurar que los resultados sean relevantes, fiables y actualizados.

En esta fase se examinan fuentes digitales como páginas web de organismos gubernamentales, asociaciones cafeteras, blogs especializados y documentos técnicos que aborden la implementación de tecnologías en la caficultura. Para filtrar las fuentes digitales de calidad se priorizan sitios web de entidades oficiales y expertos en el sector agrícola con contenido enfocado hacia tecnologías utilizadas, impacto en la producción y casos de éxito.

Además, se contrastarán los resultados con la literatura académica revisada anteriormente para garantizar la fiabilidad de la información. Este proceso de contraste permite validar los

hallazgos obtenidos en los estudios académicos con la información práctica y actualizada que se encuentra en las fuentes web, lo que brinda una visión más completa y diversa.

4.3. Beneficios y Oportunidades de Mejora

Con base en la revisión de literatura y el análisis de contenido web, se identificarán los beneficios clave de la digitalización agrícola en los cafetales y los desafíos para su implementación en pequeños productores.

Mediante los hallazgos anteriores, se desarrollará una matriz de beneficios y barreras que permitirá visualizar de manera clara y estructurada los impactos positivos y las dificultades a superar para la adopción de la Agricultura 4.0 en el sector cafetero. Esta matriz servirá como herramienta para los productores, los formuladores de políticas públicas y los investigadores, permitiendo una comprensión rápida de las principales ventajas y desafíos asociados con la digitalización agrícola.

4.4. Guía Informativa

Se desarrollará una guía que sintetice los hallazgos de la investigación, presentando los beneficios de la agricultura 4.0 para pequeños productores de café. Esta guía estará orientada a facilitar la comprensión y la implementación de estas tecnologías, debido a que puede resultar compleja de entender para pequeños cafeteros, quienes, en su mayoría, carecen de la formación técnica necesaria. La guía informativa tiene como objetivo traducir estos conceptos complejos en información accesible y comprensible para los caficultores colombianos.

La estructura de la guía busca cubrir todos los aspectos de mayor importancia, destacando los beneficios en productividad, sostenibilidad y competitividad, con orientación hacia las necesidades y condiciones del país.

La guía estará diseñada de modo práctico y visual para que los caficultores puedan comprender y aplicar las recomendaciones fácilmente. Su elaboración es clave para democratizar el acceso a las tecnologías de Agricultura 4.0 y garantizar que los pequeños productores de café puedan beneficiarse de ellas, ya que actúa como un puente entre las innovaciones tecnológicas y los caficultores, proporcionando herramientas prácticas que facilitan la transición hacia la digitalización agrícola.

4.5. Artículo Publicable

Se estructurará un artículo académico que reúna los principales resultados de la investigación, con el fin de contribuir a la difusión del conocimiento sobre agricultura 4.0 y su impacto en la caficultura.

El artículo académico se orientará a resumir y diseminar los resultados clave de la investigación, que incluyen los beneficios y desafíos de la Agricultura 4.0 en el sector cafetero, con un enfoque particular en los pequeños caficultores. Además, se buscará generar un debate académico sobre las oportunidades y limitaciones de la digitalización agrícola, con la finalidad de fomentar la adopción de tecnologías avanzadas que puedan mejorar la productividad, la sostenibilidad y la competitividad de la producción de café en Colombia.

5. Revisión Sistemática de Literatura

5.1. Análisis Bibliométrico

Con el objetivo de conocer la producción científica relacionada con la agricultura 4.0 y su aplicabilidad en los cultivos cafeteros de pequeños productores, se realizó una búsqueda en las dos bases de datos académicas más reconocidas y utilizadas en el ámbito de la investigación científica, Scopus y Web of Science.

Mediante la combinación de términos y palabras clave enfocadas en la temática en cuestión, se elaboró la ecuación de búsqueda. Esta, se compuso en inglés, debido a la importancia que tiene el idioma en el ámbito científico y se estableció el periodo de 2019-2025 para la investigación, con el fin de tener en cuenta la información más reciente.

En WOS no se obtuvo ningún resultado al incluir términos relacionados con pequeños productores, por lo que la ecuación de búsqueda, para ambas bases de datos, sólo se compuso con palabras sobre agricultura 4.0 y el cultivo de café:

SCOPUS = TITLE-ABS-KEY (("agriculture 4.0" OR "smart farming" OR "precision agriculture" OR "digital agriculture") AND (coffee OR "coffee farming" OR "coffee cultivation" OR "coffee sector" OR "coffee farmers")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025

WOS = TS=("agriculture 4.0" OR "smart farming" OR "precision agriculture" OR "digital agriculture") AND TS=(coffee OR "coffee farming" OR "coffee cultivation" OR "coffee sector" OR "coffee farmers") AND PY=(2019-2025)

Se encontró un total de 105 resultados en Scopus, de los cuales el 25.5% correspondía a las ciencias agrícolas, biológicas y ambientales, el 20% a las ciencias de la computación y el 17.5% a las áreas de la ingeniería.

Figura 1

Producción de artículos por ubicación en Scopus



En el periodo estudiado en esta base de datos, los años de mayor producción en el tema fueron el 2022 y el 2024, lo cual sugiere un interés creciente en la agricultura 4.0 aplicada al sector cafetero. Además, el principal país contribuyente fue Brasil, con un total de 59 documentos.

También, se pudo observar una tendencia positiva hacia la temática, distribuida a nivel global, figurando países tanto de Latinoamérica como Europa, resaltando Colombia, Italia, India e Indonesia, cada uno de ellos con más de 9, 8 y 6 resultados respectivamente. La aparición de

Colombia en este listado de producción, ocupando el segundo lugar después de Brasil con 10 documentos, puede ser un reflejo del potencial latente para la investigación en el tema.

Figura 2

Producción de artículos por año en Scopus y WOS



Por otra parte, aplicando la misma ecuación en WOS se obtuvieron 70 resultados, de los cuales el 65.72% correspondía a agricultura multidisciplinaria, ingeniería agrícola y agronomía, mientras que áreas como las ciencias ambientales y computacionales representaron menos del 12% de los resultados. En cuanto a la producción por años, resalta el 2022 con un total de 18 documentos publicados, siendo este el año con mayor cantidad de resultados, seguido por el 2024 con 15 resultados. La distribución por países se mantuvo similar a Scopus, figurando Brasil con un 68.57% del total de documentos, seguido por Colombia e Italia, los cuales juntos suman el 21.43% del total. En WOS también figuran España y Estados Unidos, ambos con 4 resultados.

Figura 3

Producción de artículos por ubicación en WOS



En este análisis también se encontraron universidades que mostraron gran cantidad de producción intelectual. En ambas bases de datos figuraron la Universidad Federal de Lavras, la Universidad de Sao Paulo y la Universidad Estadual Paulista, las cuales sumaron el 20.33% del total de documentos encontrados en Scopus y el 21.54% en WOS.

El estudio de los documentos con mayor número de citas arrojó tres documentos relevantes en cada base de datos. WOS fue la base de datos con mayor impacto en la temática elegida, dejando una diferencia significativa de 302 citas, con respecto a Scopus en la comparación de los tres documentos más citados. Esta diferencia es evidente debido a que el documento con mayor cantidad de citas sumó un total de 218 citas en WOS, mientras que en Scopus sumó 99 citas.

Con relación a las palabras clave, se analizaron los resultados mediante mapas de coocurrencia y éstos permitieron observar que el término más destacado en ambas bases de datos fue “precisión agriculture” y no “Agriculture 4.0” como se esperaba. Esto debido a que la agricultura de precisión se viene estudiando desde la década de 1980, mucho antes de la aparición de la A4.0, la cual surgió derivada de la Industria 4.0. Sin embargo, es importante aclarar que actualmente la agricultura de precisión se considera sólo una de la amplia variedad de tecnologías que componen la A4.0. Siendo este último un concepto mucho más amplio, que no sólo aborda problemáticas particulares a nivel de los cultivos, sino que trasciende por toda la cadena de valor agrícola y con ello, su transformación digital.

El término principal se encontró fuertemente relacionado con “remote sensing”, el cual se refiere a una herramienta de gran importancia en el marco de la A4.0, teniendo en cuenta que permite recopilar datos de los cultivos mediante drones y sensores. Las conexiones con “digital agriculture”, “IoT”, “machine learning” y “artificial intelligence”, evidencian su papel central en el procesamiento y análisis de los datos capturados. Así mismo, la aparición de términos como “uav” y “ndvi” en el clúster del café, reflejan la implementación de dichas tecnologías en el sector, principalmente enfocadas hacia la prevención de enfermedades del cultivo como “coffee leaf rust”. La presencia de términos como “sustainability” y “climate-smart agriculture” destacan a su vez, la relevancia de dichas tecnologías en el desarrollo de soluciones agrícolas que no sólo se enfocan en la productividad sino también en la sostenibilidad y resiliencia climática de los cultivos.

Figura 4

Mapa de co-ocurrencia de palabras de WOS. Extraído de Vosviewer

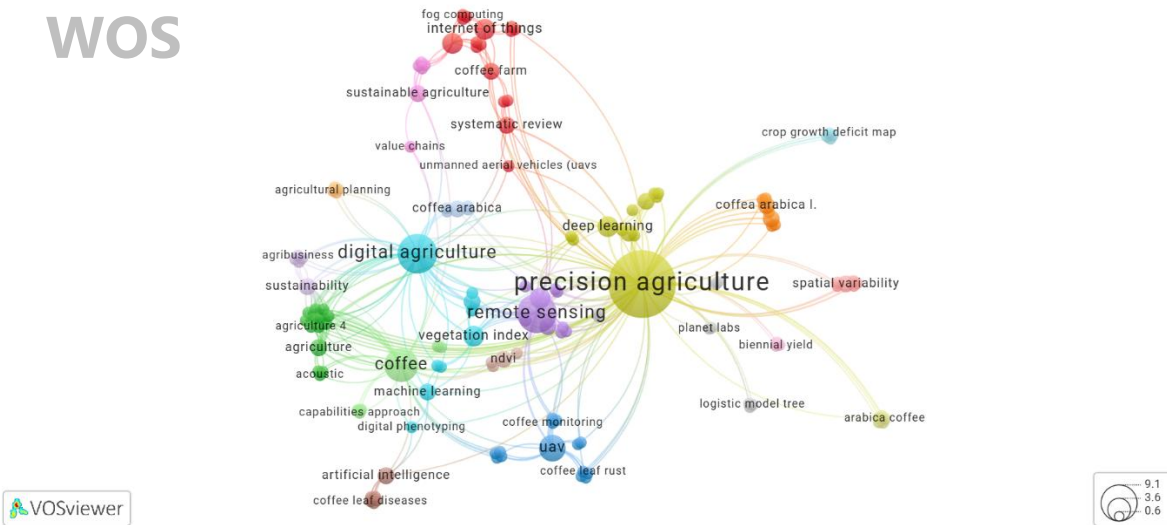
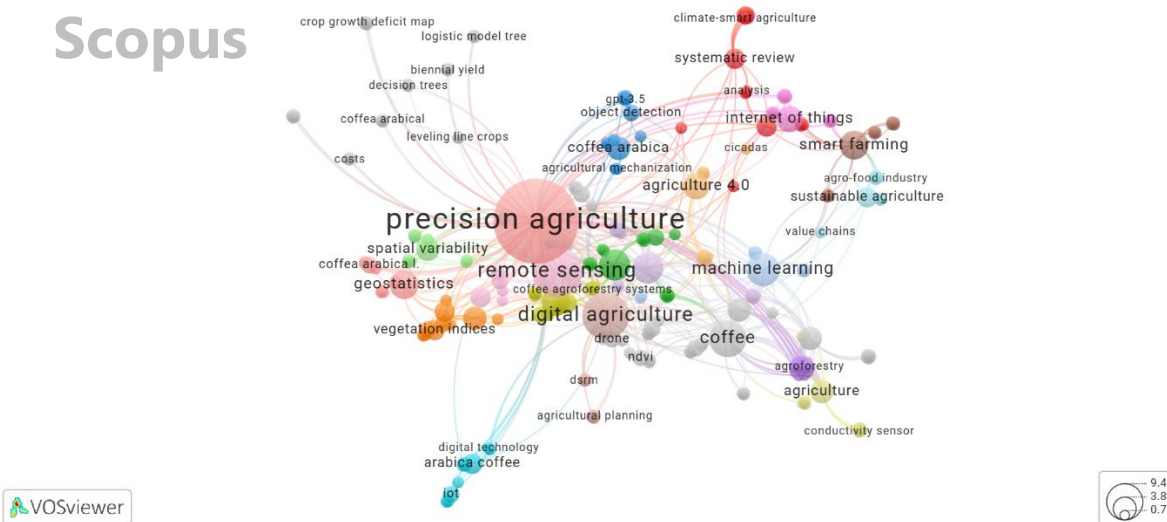


Figura 5

Mapa de co-ocurrencia de palabras de Scopus. Extraído de Vosviewer



El análisis de coautoría generado para las bases de datos elegidas permitió observar redes de colaboración entre los principales autores que estudian temas relacionados con la A4.0 como Ferraz, Gabriel Araújo e Silva y Santana, Lucas Santos.

Para el caso de WOS, figuran en los primeros lugares Ferraz y Santana con 18 y 14 documentos publicados. Estos autores destacan por su producción intelectual enfocada hacia la temática de la agricultura y las redes de coautoría que conforman muestran colaboraciones con investigadores como Molin, Bento y Martello, quienes tienen 8 resultados cada uno, dirigidos principalmente hacia la agricultura multidisciplinaria.

La visualización de la red de coautoría muestra cómo estos autores están entrelazados en una red de colaboraciones que evidencian un enfoque multidisciplinario, combinando la agricultura con otras ciencias, como la biotecnología, la ingeniería y la gestión de recursos naturales. Estas conexiones permiten la creación de nuevos marcos teóricos y metodológicos que combinan distintas áreas del conocimiento, lo que enriquece y acelera los avances en la aplicación de tecnologías de Agricultura 4.0 en diferentes sectores agrícolas.

En Scopus, se destacan Santana, Ferraz, Marin y Martello con un total de 15, 11, 8 y 8 resultados, respectivamente, los cuales están orientados en su mayoría hacia la investigación de áreas como las ciencias agrícolas y biológicas. Ellos, a su vez, muestran redes de coautoría relevantes y actúan como puentes clave entre los diversos clústeres, lo que evidencia su enfoque hacia investigaciones relacionadas entre sí.

Una de las observaciones más relevantes es cómo estas conexiones entre los autores no solo promueven el intercambio de ideas dentro de cada subcampo (por ejemplo, entre ciencias biológicas y agrícolas), sino que también favorecen la creación de nuevas líneas de investigación que combinan tecnología avanzada y agricultura sostenible. Estas conexiones demuestran cómo la colaboración internacional en la investigación agrícola es clave para resolver los desafíos globales de la producción de alimentos, el uso eficiente de recursos y la sostenibilidad del medio ambiente.

Figura 6

Mapa de co-autoría de WOS. Extraído de Vosviewer

WOS

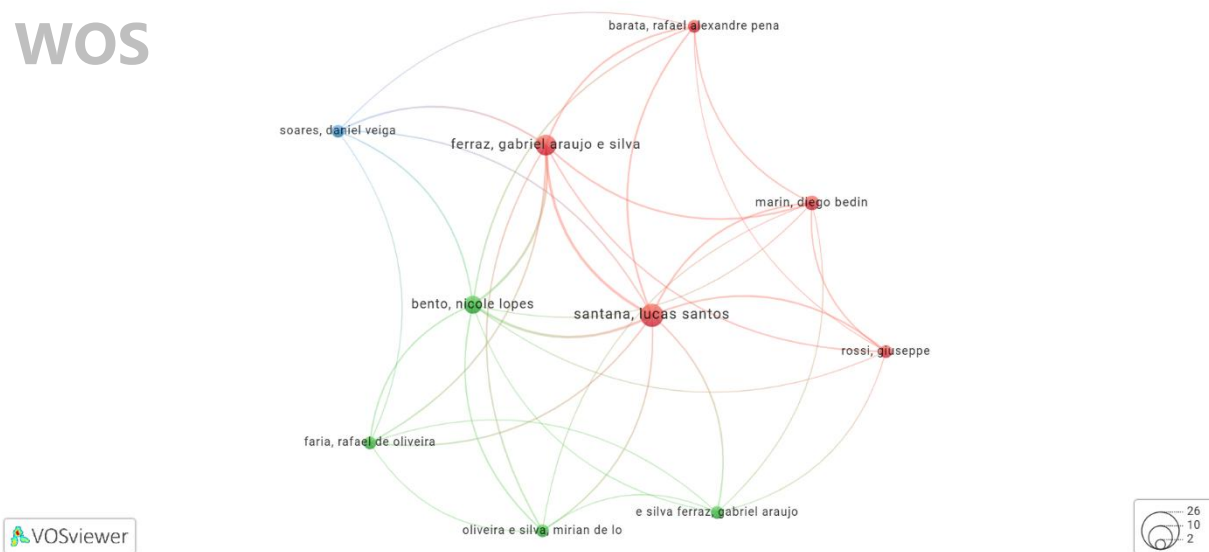
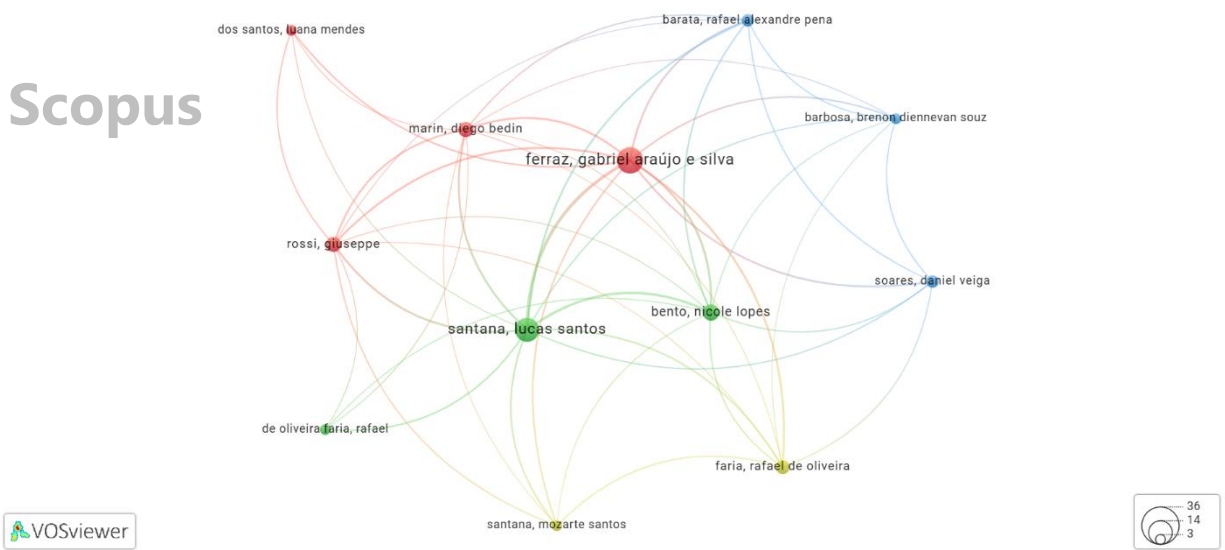


Figura 7

Mapa de co-autoría de Scopus. Extraído de Voviewer

Scopus



5.2. Análisis Preliminar de Literatura

Con el objetivo de conocer el estado actual de la literatura y el contenido web relacionado con la agricultura 4.0 en el contexto de los pequeños caficultores, este acercamiento inicial mediante un análisis preliminar de la literatura proporciona una base para profundizar en el impacto de estas herramientas y evaluar su relevancia para la mejora de la competitividad y sostenibilidad de los pequeños productores de café.

Para ello, se realizó una primera búsqueda en Google Académico, con el fin de tener un contexto general de la temática. Posteriormente se acudió a bases de datos como Scopus y Web of Science para orientar la investigación a partir de un contenido de mayor calidad, implementando criterios de inclusión y exclusión como tipo de documento (artículo), idioma (inglés y español) y que fueran de acceso abierto, así como que el enfoque principal del estudio estuviera directamente relacionado con agricultura 4.0 y café.

Además, se implementó la matriz expuesta a continuación, para recopilar los aspectos más importantes de cada documento estudiado, la cual incluía el título, autores, palabras clave, resumen, principales metodologías, técnicas de análisis, resultados y conclusiones.

Figura 8

Matriz de análisis de revisión de literatura

Nº	Título	Autores	Palabras clave	Principales metodologías	Técnicas de análisis	Resultados	Conclusiones	Resumen	Link
1	TransFesto: A Comprehensive Framework for Crop Fresh Modeling and Forecasting	Lain, E., Motta, N., Avendaño, J., Cortés, J.C.	Crop pest forecasting, data based model, knowledge-based model, smart farming	Propuesta de un marco conceptual (TransFesto) para modelar y predecir plagas en cultivos. Tres enfoques metodológicos: - Modelado basado en datos (Data Based Model): Uso de algoritmos de aprendizaje automático como XGBoost para predecir la incidencia de plagas. - Modelado basado en conocimientos (Knowledge Based Model): Representación estructurada del conocimiento experto en una jerarquía de reglas de decisiones multicriterio. - Combinación de ambos modelos para mejorar la precisión de la predicción. Caso de estudio aplicado a la roya del café (Hemileia vastatrix) en un sistema agroforestal en Costa Rica. Fuentes de datos: - Monitoreo de incidencia de la roya del café (CLR) en una estación experimental del CATIE. - Datos climáticos (temperatura, humedad, precipitación). - Propiedades del cultivo (sombra, prácticas de manejo, crecimiento vegetativo).	Roboleado basado en datos: - Se aplicaron métodos de selección de características para reducir la dimensionalidad. - Se probaron distintos algoritmos, con XGBoost obteniendo el mejor desempeño. - Validación mediante cross-validation con una métrica de error absoluto media (MAE = 7.32%). Modelado basado en conocimiento: Se estructuró el conocimiento experto en una jerarquía de toma de decisiones usando IFDEM. - La validación cruzada mostró una precisión del 86.25%, mejorada en un 7.27% al integrar elementos del modelo basado en datos. Comparación de modelos: - El modelo basado en datos superó al basado en conocimiento, para su desempeño dependa de la disponibilidad de datos. - La integración de ambos enfoques mejora la interpretabilidad y opacitabilidad del sistema.	El modelo basado en datos (XGBoost) fue más preciso en la predicción de la roya del café con un MAE de 7.32%. El modelo basado en conocimiento fue útil para describir patrones generales, pero menos preciso para predicciones específicas. La integración de ambos modelos mejoró la precisión del modelo basado en conocimiento en 7.27%, gracias a la incorporación de información estructurada de datos históricos. Validación en campo: El modelo fue probado con datos reales, asegurando su aplicabilidad en el monitoreo y control de plagas.	TransFesto es un marco robusto que guía el modelado de plagas en cultivos con un enfoque interdisciplinario. Los modelos basados en datos son más precisos, pero dependen de la disponibilidad y calidad de los datos. Los modelos basados en conocimientos son más interpretables, pero requieren ajustes para mejorar su exactitud. La combinación de ambos enfoques es ideal, ya que aprovecha la precisión de los datos y la interpretabilidad del conocimiento experto. El sistema desarrollado puede integrarse en plataformas de Agricultura 4.0 para mejorar el monitoreo y control de enfermedades en el café.	La caficultura constituye un importante recurso económico, representando una fuente de ingresos para varios países debido al alto consumo de café a nivel mundial. El manejo preciso de los cultivos de café implica la aplicación de los avances del cultivo (características del suelo y la planta), el manejo y la aplicación de insumos de acuerdo con las necesidades de las plantas. Este manejo diferenciado en el café requiere precisión y se destaca por su mayor rendimiento y sostenibilidad. RESULTADOS: Esta investigación tuvo como objetivo predecir el rendimiento en cafetales mediante la aplicación de metodologías de aprendizaje automático a los atributos del suelo y las plantas. Los datos se obtuvieron a un campo de 46.6 ha durante dos temporadas consecutivas, aplicando dosis de fertilización variables de acuerdo con las recomendaciones de los mapas de atributos del suelo. También se monitorearon mapas de análisis foliar con el objetivo de establecer una correlación entre los parámetros de entrada y la predicción de rendimientos. Los modelos de aprendizaje automático atendieron a partir de estos datos predijeron el rendimiento del café de manera eficiente. El mejor modelo demostró resultados de ajuste predictivos con una combinación de Pearson de 0.88. Los atributos químicos del suelo no interfirieron con los modelos de predicción, lo que indica que se puede prescindir de esos análisis al aplicar estos modelos. CONCLUSIONES: Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para optimizar el manejo y cultivo del café, proporcionando información valiosa para los productores e investigadores interesados en maximizar el rendimiento utilizando la agricultura de precisión.	https://www.scopus.com/inward/recordurl.url?eid=2-S2-3518504914&prq=transfesto
2	IoT Edge AI smart farming system in Colombian coffee farms	Rodríguez, JP, Méndez, M., Al, Rodríguez, Pabon, J, C, Hoyos, J, Cortés, J.C.	Smart Farming, Internet of Things, Data Analytics, Outlier Detection, BPH/Coffee Farm	Sistema de agricultura inteligente basado en una arquitectura de tres capas: - Capa de Percepción Agrícola: Se evaluaron tecnologías IoT (Drones, Libellula e Intel) según parámetros de comunicación, portabilidad, duración de batería y energía solar. - Capa Edge Computing: Se implementaron mecanismos de detección y tratamiento de datos aplicados con aprendizaje automático. Se usó el algoritmo Isolation Forest (versión de 50%) para detectar anomalías en temperatura y el método Cubic Spline para interpolar datos faltantes. - Capa de Análisis de Datos: Se analizaron variables climáticas y de manejo de cultivos con modelos de aprendizaje automático para predecir la producción de café. El algoritmo XGBoost obtuvo los mejores resultados en predicción de producción. Se validó el sistema mediante un estudio de caso en una finca.	Comparación de tecnologías IoT para monitoreo climático y agrícola, con métricas como confiabilidad de Pearson y Error Cuadrático Medio (MSE). Detección y tratamiento de datos aplicados en temperatura y humedad usando Isolation Forest, DECISION con validación mediante precisión y tasa de falsas alarmas. Interpolación de datos faltantes con técnicas de Cubic Spline, interpolación lineal y vecino más cercano. Estimación de producción de café con modelos de aprendizaje automático (XGBoost, Random Forest, Redes Neuronales, Support Vector Machines, Árboles de Regresión), evaluando métricas como Error Cuadrático Medio (RMSE) y Error Absoluto Medio (MAE).	XGBoost fue el modelo más preciso para predecir producción de café, con RMSE de 0.006, MAE de 0.002. La detección de anomalías con Isolation Forest tuvo una precisión del 99%, mejorando la confiabilidad de los datos. Se validó la utilidad del sistema IoT Agri en una finca de café, permitiendo monitoreo climático y predicción de cosecha a tiempo real. Los productores valoraron altamente la plataforma web, especialmente para planificación de cosechas y monitoreo de variables ambientales.	IoT Agri mejora la eficiencia del cultivo de café mediante el uso de tecnologías IoT y aprendizaje automático. La detección y corrección de datos aplicados es crucial para garantizar la confiabilidad en la toma de decisiones agrícolas. El uso de predicciones basadas en datos climáticos y manejo del cultivo puede optimizar la producción y reducir pérdidas. Se recomienda ampliar el sistema con detección de plagas e enfermedades, así como integración con drones y sensores multispectrales.	En la actualidad, la adopción de tecnologías inteligentes para sistemas agrícolas sostenibles es una clara ventaja competitiva para los agricultores. Los servicios de extensión, la agroindustria y los responsables de la formulación de políticas. Sin embargo, seleccionar las tecnologías más adecuadas entre una amplia gama de opciones nunca es una tarea fácil. En este contexto, varios autores consideran al Smart Farming, como la mejor solución. Sin embargo, se quedan cortos a la hora de proporcionar más información para recomendar la tecnología de IoT más adecuada, las opciones para gestionar la infraestructura de IoT y los servicios para las plantas de gestión de cultivos y la estimación de la producción de cultivos. Este artículo implementa un sistema de agricultura inteligente basado en una arquitectura de tres capas (Percepción de la agricultura, Edge Computing y Análisis de datos). En la Capa de Percepción de la Agricultura, evaluamos las tecnologías Drones, Libellula e Intel bajo criterios como el precio, la cantidad de muestras para la conexión del sensor, los protocolos de comunicación, la portabilidad, la duración de la batería y el perfil de consumo del sistema de energía de respaldo. Evaluamos los mecanismos de gestión basados en la nube en la capa perimetral para proporcionar fiabilidad de los datos, correspondencia en la detección y el tratamiento de valores atípicos mediante algoritmos de aprendizaje automático e interpolación. Recomendamos el algoritmo Isolation Forest para clasificar los valores atípicos en el conjunto de datos de temperatura mensual (50 % de precisión) y la técnica Cubic Spline para interpolar eficientemente los datos clasificadas como valores atípicos (RMSE relativo a 0.006). En la capa de análisis de datos, evaluamos diferentes algoritmos de aprendizaje automático para estimar la producción de café. Los resultados muestran que los valores de error métrico del algoritmo	https://www.velvetforce.com/blog/iot-agri/

En el caso de la caficultura, la aplicación de la Agricultura 4.0 está comenzando a ser reconocida por su capacidad para optimizar el uso de recursos en las fincas cafeteras. A través de tecnologías como los sensores de humedad del suelo, los drones para monitoreo de cultivos y los sistemas de riego automatizados, los pequeños productores pueden mejorar el rendimiento de sus cultivos de café, reducir el consumo de insumos y minimizar el impacto ambiental de la producción.

Los beneficios clave reportados en la literatura académica incluyen una mayor trazabilidad del producto, que permite a los productores mejorar la calidad del café y acceder a mercados más exigentes. Las soluciones digitales, al integrarse con sistemas de gestión de recursos agrícolas, ofrecen la posibilidad de predecir condiciones climáticas y controlar las plagas, lo que ayuda a prevenir daños a los cultivos antes de que se conviertan en un problema.

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías no está exenta de desafíos. La literatura también señala que, aunque los beneficios potenciales son significativos, los pequeños productores de café enfrentan barreras económicas y tecnológicas que dificultan la implementación de estas herramientas avanzadas.

En las siguientes secciones se sintetizan los hallazgos más destacados de la literatura académica reciente y los recursos web especializados, abordando conceptos clave, ejemplos de aplicaciones tecnológicas y áreas de oportunidad en el campo de la agricultura digital.

5.2.1. Innovaciones globales en Agricultura 4.0 para el sector cafetero

La agricultura digital ha ganado una gran relevancia en los últimos años, derivada del incremento en los estudios realizados a nivel internacional y los buenos resultados que estos han demostrado con su implementación. Tecnologías como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y el uso de drones son las que más se mencionan como herramientas para mejorar la productividad, eficiencia y sostenibilidad de los cultivos.

El pronóstico de plagas en los cultivos ha sido un enfoque de estudio destacado en la mayoría de la literatura encontrada y particularmente en el café, siendo una producción que se ve tan afectada por infestaciones como la Roya, se convierte en una problemática de interés para solucionar mediante la recolección y análisis de datos en los campos sembrados. Es así como surge Framepests en Costa Rica, un marco conceptual para la predicción de plagas aplicado a la roya del café (*Hemileia vastatrix*) desarrollado por Laso, Motisi, Avelino y Corrales en 2021. Este modelo se diseñó para combinar un enfoque basado en datos y otro basado en conocimiento. En el primero

se usaron algoritmos de aprendizaje automático como XGBoost para predecir la incidencia de plagas con una precisión medida en un error absoluto medio (MAE) del 7.19%. En el segundo, se estructuró la información de expertos en una jerarquía de toma de decisiones multicriterio, logrando inicialmente una precisión del 56.03%, mejorada en un 7.07% al integrar elementos del modelo basado en datos. De esta manera, el estudio concluyó que la mejor manera de realizar el monitoreo y control de las plagas es combinando ambos enfoques, con el fin de aprovechar la precisión de los datos y la interpretabilidad del conocimiento experto.

Relacionado con la gestión de plagas y enfermedades en los cultivos, se encontró también un estudio enfocado en la evaluación del desempeño de redes neuronales artificiales (ANNs) para la detección de enfermedades en hojas de café mediante visión artificial. En la investigación de Albuquerque y Guedes, miembros de Amazonas State University se utilizó un total de 58,550 imágenes de hojas de *Coffea arabica* obtenidas en Kenia, con las que patólogos las clasificaron en cinco categorías: hojas sanas, cercospora (*Cercospora coffeicola*), roya (*Hemileia vastatrix*), phoma (*Phoma costarricensis*) y minador (*Leucoptera coffeella*). Los resultados destacaron a ShuffleNet como el modelo más eficiente, con una precisión del 99.95 % en la detección de enfermedades en hojas de café. A pesar de su alto rendimiento, el estudio identificó ciertas limitaciones como que la base de datos principal proviene de Kenia, lo que podría afectar la generalización de los modelos en otras regiones. Asimismo, la falta de imágenes de enfermedades en etapas tempranas podría limitar la capacidad del sistema para la detección precoz.

Otro estudio relevante se llevó a cabo en Kumily Panchayat, distrito de Idukki, Kerala, India, una región destacada por la producción de cardamomo, pimienta negra y café. En este estudio, se exploró la predicción de la aptitud de suelos para cultivos mediante sensores de suelo

habilitados para IoT y aprendizaje automático. Las variables que se tuvieron en cuenta para su medición fueron la humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica y niveles de nitrógeno, fósforo y potasio. Se recopilaron muestras para cardamomo, pimienta negra y café, abarcando diferentes altitudes y tipos de suelo para garantizar representatividad. Los datos recolectados fueron analizados utilizando algoritmos de aprendizaje automático, destacándose XGBoost y AdaBoost y se confirmó la eficacia del sistema para proporcionar predicciones precisas sobre la idoneidad del suelo para cada cultivo, generando una solución de gran importancia en la toma de decisiones informadas basadas en datos en tiempo real por parte de los productores.

5.2.2. La digitalización agrícola en el mundo: Perspectivas y desafíos

La implementación de tecnologías de agricultura 4.0 ha demostrado grandes beneficios en las investigaciones realizadas hasta el momento, sin embargo, no deja de ser relevante conocer las perspectivas que existen tanto en los actores interesados en digitalizar los procesos en sus cultivos como en los que no tienen ninguna motivación. Es por esto que se desarrolló un estudio en North Toraja, Indonesia, donde los autores evaluaron el impacto de tecnología digital en la producción y comercialización del café. Analizaron el papel de las instituciones privadas y gubernamentales, los beneficios, los desafíos y las áreas que se ven mayormente impactadas.

Los resultados mostraron que las instituciones privadas aportan gran valor en cuanto a la transparencia de precios en el proceso de venta y se identificó que hubo un crecimiento del comercio electrónico del café derivado de la pandemia, lo que ayudó a la expansión a nuevos mercados y a la reducción de costos de transacción. Los desafíos no se quedan atrás, pues los autores identificaron barreras en la adopción de las tecnologías como la ausencia de capacitación

y de infraestructura apta, principalmente en las zonas rurales, así como la presencia acaparadora de intermediarios tradicionales en toda la cadena de suministro del cultivo. De ahí la necesidad de fortalecer la educación de los productores y fomentar el apoyo gubernamental para maximizar los beneficios y las innovaciones en el sector.

Por otra parte, siendo Brasil uno de los países más reconocidos por la producción de café, los estudios investigativos en el tema no se quedan atrás. Gran parte de la literatura está centralizada en este país y destaca un estudio desarrollado en municipios de Bahía, Brasil. Este se enfocó en evaluar la aplicabilidad de la agricultura de precisión en cultivos de café, a través de un cuestionario enviado a productores. Mediante el cuestionario, se recopilaron datos sobre el uso, percepción y barreras para la implementación de la AP. Los resultados indicaron que el 59.3% de los encuestados mostraban una visión positiva y expectativas favorables frente al uso de estas herramientas, pero el 67.6% no la usaban en ese momento. La principal barrera identificada es congruente con los resultados de estudios en otras partes del mundo y es que, la falta de capacitación afecta significativamente el alcance y la accesibilidad a las innovaciones tecnológicas del agro. En esta investigación se comprobó que los encuestados no carecían de interés por mejorar sus procesos, sin embargo, las limitaciones de conectividad son otro motivo por el que se abstienen de entrar a la digitalización actualmente.

5.3.3. Agricultura 4.0 en Colombia: Capacidades y adopción tecnológica en la caficultura

La digitalización de la agricultura colombiana enfrenta desafíos particulares que difieren de los identificados en otros países. En Brasil existe un alto interés por las tecnologías, a pesar de la baja adopción de estas. En el caso contrario, Colombia se encuentra bajo un condicionamiento

por factores culturales, económicos, políticos y de infraestructura, lo que hace que la relación entre caficultores y digitalización no pueda analizarse solamente desde la productividad o eficiencia, sino que debe entenderse en el marco de valores y prioridades locales.

En una investigación realizada a comunidades cafetaleras de la Sierra Nevada de Santa Marta y los Andes centrales-occidentales se pudo evidenciar que los colombianos se caracterizan por la resistencia a la automatización y se considera de mayor valor el conocimiento empírico y el trabajo manual, por lo que existe una percepción negativa sobre la digitalización y los sistemas automatizados.

La problemática de falta de capacitación técnica es también un factor de impedimento como en otros países, pero en Colombia, las barreras estructurales como conectividad limitada, altos costos de adquisición de los equipos, exclusión digital rural y la desconfianza hacia modelos de producción tecnificados son variables que amplifican la dificultad de ingreso en la A4.0. En el estudio de las comunidades cafetaleras de la Sierra se conoció que los dispositivos como robots son percibidos como amenazas a la calidad del café y la estabilidad del empleo rural.

De igual manera, la inteligencia artificial y el IoT son herramientas que presentan grandes desafíos con la producción cafetera colombiana. Por una parte, los celulares y aplicaciones como WhatsApp y redes sociales han sido apropiadas por los agricultores para facilitar la comunicación y hasta la comercialización de sus productos, pero por otra parte, ven con gran dificultad el uso de nuevas tecnologías intangibles, debido a la orientación errónea en proyectos que no tienen en cuenta las necesidades reales del sector. En este sentido, iniciativas como IoT-Agro muestran el potencial de la tecnología cuando se implementa con un enfoque adaptado a la realidad local. Este sistema integra sensores y modelos de aprendizaje automático para monitorear y mejorar la

planificación de las cosechas con datos en tiempo real, brindando información valiosa para una toma de decisiones conscientes, pero sin desplazar el conocimiento tradicional de los cafeteros. Sin embargo, la fiabilidad de estas soluciones depende del acceso a conectividad, el cuál es limitado precisamente en las zonas rurales, donde se encuentran los cultivos.

Para abordar este problema, en un estudio se propuso un enfoque basado en la computación en la niebla (Fog Computing) para mejorar la fiabilidad de los datos en la agricultura inteligente. La arquitectura combina Machine Learning y técnicas de interpolación para detectar y corregir valores atípicos en los datos recopilados por sensores IoT en fincas cafeteras. Este sistema permite procesar la información de manera más eficiente y reducir la dependencia de la nube, asegurando la continuidad del monitoreo en regiones con acceso limitado a internet.

No obstante, se debe asumir que para lograr una verdadera apropiación tecnológica, es clave que los desarrollos digitales sean diseñados en colaboración con las comunidades rurales, asegurando que la digitalización de la caficultura colombiana no solo sea una imposición externa, sino un proceso construido desde las necesidades y valores locales.

6. Análisis de Contenido Web

Para desarrollar el análisis se siguió la metodología de Neuendorf (2002), aplicada en estudios previos sobre la digitalización en el sector agropecuario. Para ello, se seleccionó información publicada en las páginas web oficiales de organismos gubernamentales, autoridades nacionales como la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) y de asociaciones nacionales e internacionales. Para el filtrado de los contenidos, se establecieron como criterios clave los

idiomas inglés y español, y que las temáticas tratadas correspondieran a agricultura 4.0 excluyendo la agricultura de precisión. Una vez seleccionados los contenidos, se realizó la lectura detallada de cada uno y se plasmaron los puntos más importantes en una matriz de análisis conformada por las tecnologías, oportunidades, barreras y finalmente los apuntes relevantes de cada uno.

Figura 9

Matriz de análisis de contenido web

Nº	TÍTULO	FUENTE	APUNTES CLAVE	TECNOLOGÍAS	OPORTUNIDADES	BARRERAS	LINK
1	Agro 4.0, el programa del MinTC y el CAIRCO que busca mejorar la productividad del sector agropecuario con la implementación de tecnologías avanzadas	ACIS	<ul style="list-style-type: none"> - Diez pilotos en diferentes regiones del país, que benefician a pequeños y medianos agricultores de tres cadenas productivas, café, cacao y aguacate - Urao (Antioquia), Andes (Antioquia), Florián (Santander), El Carmen de Chucurí (Santander), Isnos (Huila), Tierralta (Córdoba), Florencia (Caquetá), Urumita (La Guajira), Santa Marta (Magdalena) y Chinchiná (Caldas) - Instalación de sensores inalámbricos de acuerdo con cada caso de uso para realizar la captura de datos, considerando variables agroclimáticas y de humedad de suelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Inteligencia Artificial (IA): Aplicaciones en análisis predictivo de cosechas y prevención de plagas. - Big Data: Uso de datos agrícolas para optimizar la producción y distribución de cultivos. - Internet de las Cosas (IoT): Implementación de sensores para monitoreo en tiempo real de variables agroclimáticas. - Blockchain: Mejora de la trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro agrícola. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la eficiencia en la producción agrícola. - Mejora en la trazabilidad y comercialización de productos agrícolas. - Reducción de costos operativos mediante la automatización de procesos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de conectividad en zonas rurales - Resistencia al cambio por parte de los productores tradicionales - Acceso limitado a financiamiento para la digitalización del agro. 	https://acis.org.co/s-ontal/comunicacion/sector/agro-4-0-el-programa-del-min-tc-y-el-cairco-que-busca-mejorar-la-productividad-del-sector
2	UNIMAGDALENA y Fedecafeteros trabajan por incluir tecnología 4.0 en la producción del café	UNIMAGDALENA	<p>La sinergia entre UNIMAGDALENA y Fedecafeteros espera ser el punto de partida para desarrollar tecnologías en la industria cafetalora y mejorar la calidad de vida de familias cafeteras de la Sierra Nevada de Santa Marta.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sensores inteligentes e IoT: Permiten monitorear el estado del suelo, la humedad y la temperatura en tiempo real. - Drones y robótica agrícola: Facilitan la supervisión de cultivos y optimizan el uso de fertilizantes y pesticidas. - Big Data e Inteligencia Artificial (IA): Aplicaciones en análisis predictivo de cosechas y mejora en la toma de decisiones. - Blockchain: Garantiza la trazabilidad y autenticidad del café colombiano en mercados internacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de la eficiencia en la producción agrícola. - Disminución del impacto ambiental mediante la optimización de insumos. - Acceso a mercados internacionales con certificaciones tecnológicas de calidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - La adopción de tecnologías avanzadas sigue siendo costosa para pequeños productores. - Problemas de conectividad dificultan el uso de herramientas digitales. - Se requiere mayor capacitación en el uso de tecnologías digitales en el agro. 	https://www.unimagdalena.edu.co/presenacion/Publicacion/VerNoticia/323159

Mediante el estudio de la matriz elaborada se pudo observar que las fuentes elegidas coinciden en que la agricultura 4.0 está diseñada en pro del incremento en la eficiencia y sostenibilidad de los cultivos, siendo las tecnologías como Big Data, Inteligencia Artificial, Internet de las Cosas, Blockchain y Robótica las más destacadas. Según un informe publicado por Oliver Wyman, los aspectos que ejercen más presión en la agricultura mundial son la demografía, la escasez de recursos naturales, el cambio climático y el desperdicio de alimentos, problemáticas que se pueden ver muy reducidas con la automatización de las producciones (Oliver Wyman, 2018). Por otra parte, en el Foro Económico Mundial de 2023, se destacó el papel del Blockchain en la trazabilidad de los productos agrícolas, facilitando las exportaciones a mercados que exigen altos estándares de calidad, en los que comúnmente se ve inmerso el café (World Economic Forum, 2023).

En el boletín tecnológico de 2022, la Superintendencia de Industria y Comercio colombiana afirma que el café es un sector con la oportunidad latente de mejorar su productividad y competitividad con tecnologías digitales. Además, se mencionan patentes ya desarrolladas en el país como una prensa mecánica para medir la humedad de los granos y métodos y sistemas para identificar zonas agroclimáticas de forma automática. La prensa mecánica fue desarrollada por el inventor colombiano Gonzalo Roa Mejía y permite medir con precisión el contenido de humedad de los granos, lo cual es fundamental para garantizar la calidad del café y evitar deterioros durante el almacenamiento y proceso de secado. Esta innovación representa un paso hacia la modernización de los métodos tradicionales y mejora la precisión en la medición de humedad, un factor crítico en la producción de café de calidad. Otra patente importante es la identificación automatizada de zonas agroclimáticas, solicitada por Tata Consultancy Services. Esta patente utiliza métodos y sistemas para recibir y analizar parámetros ambientales y del suelo en tiempo real, lo cual permite identificar con precisión las zonas agroclimáticas más adecuadas para el cultivo de café. Este sistema de monitoreo automatizado mejora la eficiencia en la toma de decisiones y genera una mayor exactitud en la predicción de los efectos del cambio climático en las regiones productoras de café (Superintendencia de Industria y Comercio, 2022).

De igual manera, en el año 2021 se incentivó un programa liderado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTic) y el Centro para la Cuarta Revolución Industrial de Colombia (C4IR.CO) llamado Agro 4.0, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sector a través de sensores inalámbricos que realizaban la captura de datos de variables climáticas y del suelo. El proyecto se desarrolló en tres fases: la inmersión y mapeo de oportunidades, donde se identificaron las regiones y agricultores adecuados; la fase de diseño y

ejecución de los pilotos, que involucró la instalación de sensores y el uso de drones para recolectar datos; y la fase de escalamiento, que buscaba elaborar políticas públicas basadas en los resultados. Se pusieron en marcha diez pilotos en diferentes regiones del país focalizados en cadenas productivas de café, cacao y aguacate, por medio de los cuales se logró que los productores conocieran y adoptaran herramientas digitales avanzadas, se generaron recomendaciones de políticas públicas para facilitar la expansión y replicación de los pilotos y así mismo se identificaron las dificultades de infraestructura rural que limitan significativamente la efectividad de las tecnologías usadas (ACIS, 2021).

La academia también desempeña un papel fundamental en la promoción de la digitalización y es así como la Universidad del Magdalena, en colaboración con la Federación Nacional de Cafeteros han trabajado en la implementación de Inteligencia Artificial para las familias cafeteras de la Sierra Nevada de Santa Marta, explorando soluciones para medir la humedad del suelo y optimizar el riego. Como se mencionó, la principal tecnología será la IA, que, por medio de modelos predictivos, podrá anticipar problemas como enfermedades de las plantas o cambios en las condiciones climáticas, lo que permitirá a los caficultores actuar de manera proactiva para proteger los cultivos y optimizar los recursos (Universidad del Magdalena, 2024). Además de la implementación de estas tecnologías, el proyecto también está enfocado en capacitar a los caficultores y mejorar su acceso a herramientas tecnológicas. Según la doctora Idanis Diaz Bolaño, en su intervención en el Encuentro de Líderes Departamentales de Extensión Rural “Desafíos de la caficultura 2024-2027”, donde se habló del proyecto entre la Unimagdalena y Fedecafeteros, el uso de tecnologías como la IA tiene efectos en la producción y en el acceso a

información sobre tiempos para cultivar y cosechar, sobre plagas o enfermedades y con ello ayuda a reducir pérdidas por desconocimiento y falta de monitoreo de las plantas.

A pesar de la variedad de beneficios que se mencionan en todos los contenidos consultados, también se evidencia la dificultad que por parte de los productores debe ser abordada. Desafíos como la falta de conectividad en zonas rurales, los altos costos de implementación y la brecha de conocimiento y resistencia al cambio de los caficultores, no son temas ausentes en la transición a la agricultura 4.0. Comenta la revista Semana (2023) que María Fernanda Nossa, jefe de conocimiento global del cliente para soluciones agrícolas de Basf, durante el foro Colombia Rural 2023, enfatizó en que las innovaciones no sólo benefician a los grandes productores, sino que también pueden mejorar las condiciones de los pequeños agricultores si se implementan estrategias de financiamiento adecuadas y también destaca que se requieren políticas públicas que incentiven el acceso a crédito para la compra de tecnología, así como programas de capacitación en herramientas digitales. En concordancia,

7. Resultados

7.1. Contraste entre literatura y contenido web

La investigación realizada ha permitido analizar la importancia de la Agricultura 4.0 en el sector cafetero a partir de dos enfoques complementarios: la revisión de literatura científica y el análisis de contenido web.

Mediante la revisión de literatura se pudo identificar que la digitalización agrícola es una tendencia global con múltiples beneficios en términos de productividad, competitividad y

eficiencia. Por otro lado, el análisis web permitió identificar cómo está siendo aplicada la tecnología digital en el sector cafetero, con iniciativas como el proyecto Agro 4.0, en el que se quiso impulsar la adopción de herramientas digitales.

Si bien ambos enfoques abordan la digitalización del agro, la literatura académica se centra en el impacto estructural de la agricultura 4.0, incluyendo sus efectos en sostenibilidad, economía y seguridad alimentaria. En cambio, los contenidos web reflejan casos concretos de implementación, iniciativas gubernamentales y noticias del sector.

A continuación, se presenta una matriz comparativa de la información obtenida a través de los análisis realizados:

Tabla 2

Matriz comparativa entre análisis

Aspecto	Literatura Científica	Contenido Web
Enfoque principal	Teórico, con análisis estructural del impacto de la Agricultura 4.0.	Práctico, con casos concretos de implementación en los países.
Tecnologías clave	Big Data, IoT, Blockchain, IA y Automatización.	Sensores, trazabilidad mediante Blockchain y uso de drones.
Aspectos resaltados	Eficiencia de recursos, impacto ambiental, análisis a nivel global, barreras de implementación.	Productividad, reducción de costos, análisis a nivel particular.

Tanto la literatura como los contenidos web destacan la necesidad de políticas públicas, financiamiento accesible y educación tecnológica para que los productores adopten estas herramientas. La combinación de ambos enfoques ha permitido obtener una visión integral de la digitalización del agro.

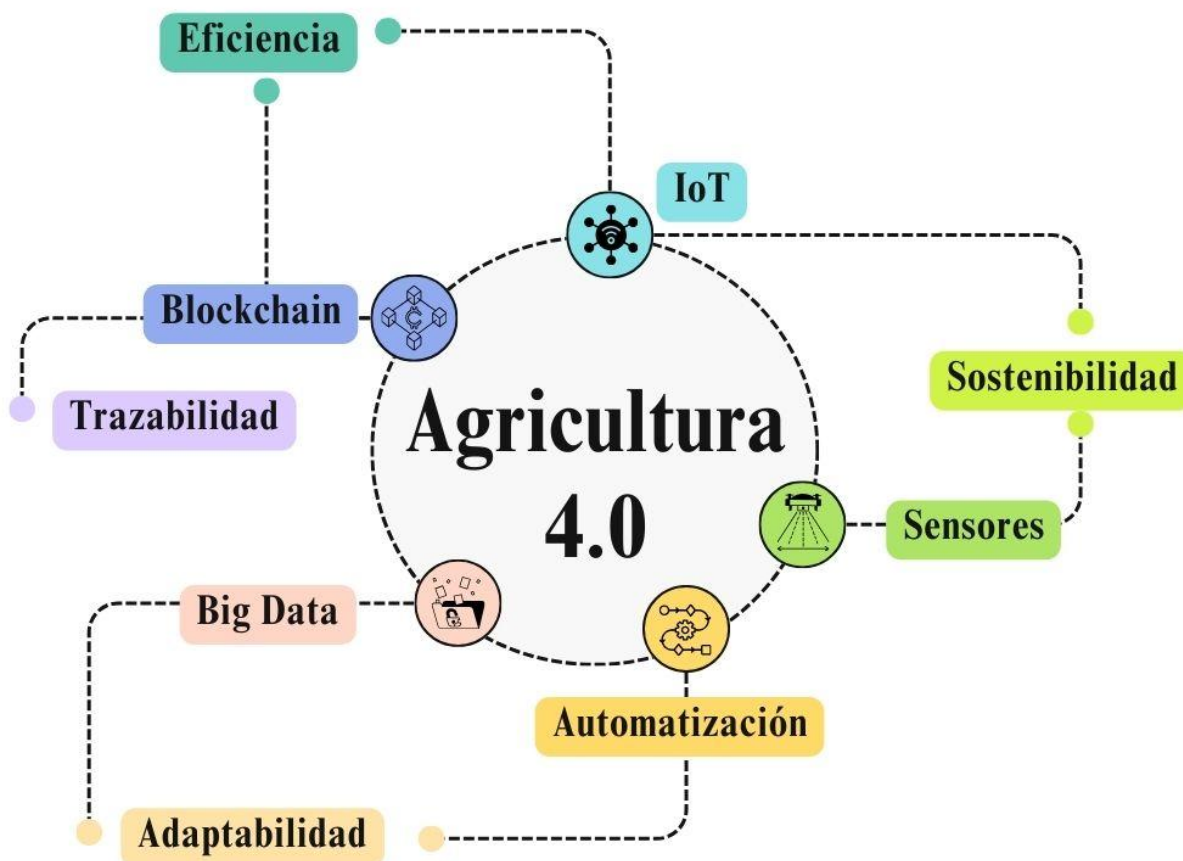
7.2. Beneficios de la digitalización de la caficultura

El proceso de digitalización del agro ha demostrado ser un factor clave para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad en el sector. Particularmente en el contexto colombiano, la implementación de tecnologías emergentes ha traído beneficios significativos para la caficultura, por lo que, a partir del estudio realizado, se identificaron las principales ventajas que tiene la digitalización de los cultivos cafeteros y la relación que guardan con las tecnologías más destacadas de la agricultura 4.0.

Mediante el siguiente diagrama se puede entender de forma visual cómo las tecnologías de la A4.0 impactan y generan beneficios clave en la producción cafetera. El concepto central abarca las herramientas más reconocidas y estudiadas en la actualidad; la combinación de las mismas da como resultado una agricultura encaminada hacia la digitalización y el desarrollo del sector productivo.

Figura 10

Gráfico de beneficios



De esta manera, se puede observar que la interacción entre IoT, Big Data, Blockchain, sensores y automatización genera sinergias que optimizan los procesos agrícolas, mejoran la sostenibilidad y transparencia, y permiten a los caficultores enfrentar los desafíos cambiantes del entorno global y del mercado.

7.2.1. Eficiencia

La tecnología más usada actualmente son los sensores, que mediante IoT y Big Data, monitorean en tiempo real los cultivos y ayudan a tomar decisiones informadas frente a controles

de enfermedades y plagas, así como de las condiciones del suelo, la gestión del riego y las fertilizaciones. De esta manera, los productores se benefician al poder evaluar la salud de sus plantas con un margen de anticipación que limita los insumos desperdiciados y el incremento inesperado en los costos. Aunque no necesariamente aumenta el volumen de la producción, el impacto positivo se ve reflejado en términos de eficiencia, con una maximización de los resultados usando el mismo nivel de insumos y evitando que los agricultores se enfrenten a pérdidas por desconocimiento del estado de sus campos.

Además, la combinación entre IoT y Blockchain asegura la trazabilidad de los productos agrícolas, permitiendo a los caficultores garantizar la calidad y el origen del café que producen. Cada paso del proceso de producción, desde la siembra hasta la venta, puede ser registrado digitalmente y rastreado por los consumidores. Según Giraldo (2020), Blockchain facilita la transparencia en la cadena de suministro, lo que mejora la confianza de los consumidores y facilita el cumplimiento de los estándares internacionales de calidad y sostenibilidad

7.2.2. Sostenibilidad

Derivado de la adecuada gestión de los recursos no renovables y de insumos como los agroquímicos, la sostenibilidad ambiental se ve favorecida gracias a la precisión mejorada en las dosis de productos que se aplican para cuidar la salud de las plantas. Ajustar las dosis de acuerdo con las necesidades exactas de los cultivos, evita la aplicación uniforme, excesiva o inútil y, a su vez, disminuye la contaminación del suelo y del agua con fertilizantes o plaguicidas que pueden afectar los ecosistemas locales, por ejemplo, contaminando las fuentes de agua cercanas o alterando la biodiversidad de las zonas aledañas.

Los sensores están en el corazón de muchas de las tecnologías agrícolas modernas. Usados para medir diversos parámetros, permiten monitorear y ajustar las condiciones de cultivo con una precisión que anteriormente no era posible. El IoT permite conectar estos sensores y dispositivos digitales, para facilitar la gestión de la información que recopilan. Ambas herramientas son fundamentales para garantizar que los recursos como el agua y los fertilizantes sean utilizados de manera eficiente, lo que contribuye a una agricultura más sostenible y rentable. Según Adrian & Teran (n.d.), el uso de sensores conectados al IoT en la agricultura permite monitorear condiciones como la humedad y la temperatura, lo que optimiza el uso de recursos y previene el desperdicio. Esto también significa un beneficio adicional para la competitividad de los pequeños cafeteros, quienes se encuentran abordando un mercado que cada vez reclama con mayor rigor el cumplimiento de estándares ambientales. Los consumidores conscientes presentan mayor predilección por productos que demuestran un compromiso con el medio ambiente y a nivel internacional, esto puede traducirse en precios más altos y mayor demanda en clientes que valoran la sostenibilidad.

7.2.3. Trazabilidad

Mediante Blockchain, los cafeteros pueden garantizar la calidad y el origen de su producto a lo largo de toda la cadena de suministro. Esto significa que, mediante el registro digital de cada etapa del proceso de producción y distribución, se puede garantizar la autenticidad y la calidad del café, lo que es especialmente importante para el mercado global, que exige altos estándares de calidad y transparencia en la producción. Los productores pueden registrar detalles como origen

del grano, prácticas de cultivo usadas, métodos de cosecha y todos los tratamientos posteriores de transformación.

La trazabilidad permite obtener beneficios económicos al garantizar que los consumidores reciban productos certificados y también fomenta las prácticas agrícolas sostenibles, ya que, al registrar cada etapa del proceso productivo, se vuelve necesario aportar técnicas de cultivo responsables y cumplir con normativas ambientales.

7.2.4. Adaptabilidad

El acceso a información detallada sobre el clima, el suelo y las condiciones de los cultivos permite que los pequeños productores de café puedan anticiparse a eventos que afecten el bienestar de sus plantas y que ajusten las prácticas agrícolas en consecuencia. Esta capacidad mejora la adaptación ante factores externos que pueden influir negativamente en la productividad, como las variaciones climáticas y las plagas.

En este punto, el Big Data juega un papel muy relevante por la facilidad que brinda en la recolección y análisis de grandes cantidades de datos generados por sensores y dispositivos en el campo. Según Impacto TIC (2023), el análisis de datos a gran escala ayuda a adaptarse rápidamente a condiciones cambiantes, lo que es crucial para garantizar la sostenibilidad a largo plazo. Además, la combinación de esta digitalización con el uso de robots y drones mejora la eficiencia en tareas como la cosecha, la siembra, y la revisión de los cultivos. La automatización reduce la necesidad de intervención manual y asegura que los cultivos reciban el mantenimiento adecuado en todo momento. Rodríguez et al. (2021) indican que la automatización facilita la

adaptabilidad de los caficultores frente a condiciones imprevistas, como cambios climáticos repentinos o la aparición de plagas.

También es importante tener en cuenta que el café es un producto que varía mucho de precio, especialmente si se comercializa sin pasar por un proceso de transformación como el tueste. Por esta razón, el hecho de que los caficultores puedan tomar decisiones y minimizar riesgos con antelación, reduce de forma significativa el estrés económico causado por eventos impredecibles y permite asegurar una producción más estable a lo largo del tiempo.

7.3. Oportunidades de mejora en la implementación de pequeños productores cafeteros

Para garantizar una adopción efectiva y accesible por parte de todo el sector cafetero es importante identificar las barreras y desafíos que existen en la actualidad. Estos, incluyen inconvenientes relacionados con infraestructura, capacitación, acceso a financiamiento y resistencia cultural, por lo que se deben buscar alternativas para crear entornos favorables que faciliten el acceso y utilización por parte de todos los actores del proceso productivo.

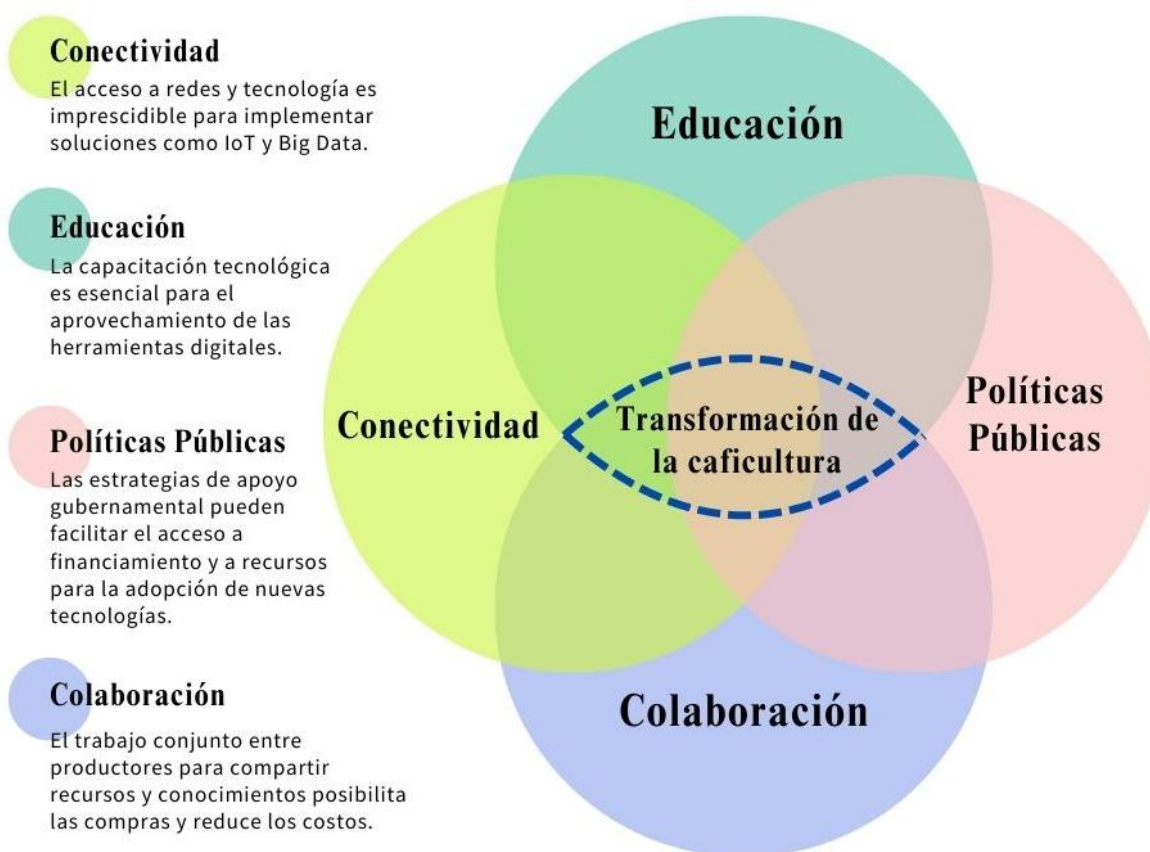
La transformación de la caficultura solo es posible cuando las oportunidades de conectividad, educación, políticas públicas y colaboración se alinean y trabajan de manera conjunta. Si bien cada oportunidad tiene su propio impacto directo, el verdadero cambio en el sector caficultor se produce cuando estas áreas se intersecan y se potencian entre sí.

El gráfico de Venn que se muestra a continuación permite entender cómo las oportunidades de mejora interrelacionadas contribuyen a una transformación integral en el sector caficultor a través de la Agricultura 4.0. La relación entre las oportunidades (conectividad, educación, políticas

públicas y colaboración) ilustra cómo cada uno de estos aspectos, por sí mismo, representa un desafío importante, pero cuando se combinan, tienen el potencial de transformar completamente la caficultura.

Figura 11

Gráfico de oportunidades mejora



La transformación del sector agrícola ocurre cuando estas oportunidades se combinan y se refuerzan mutuamente. Esto subraya la idea de que ninguna de estas oportunidades puede funcionar de manera aislada. Por ejemplo, sin la capacitación tecnológica, la conectividad por sí sola no tendría un impacto positivo. La educación habilita a los caficultores para utilizar las redes

y tecnologías de comunicación de manera efectiva, facilitando el uso de IoT y Big Data en sus prácticas diarias.

A través de políticas públicas adecuadas se puede mejorar la infraestructura de conectividad en zonas rurales, donde muchos caficultores todavía enfrentan problemas de acceso a internet y redes de comunicación. Y, finalmente, la formación colaborativa entre caficultores y expertos tecnológicos puede ser una vía eficiente para compartir conocimientos y habilidades, permitiendo que los productores aprendan sobre el uso de nuevas herramientas tecnológicas de manera compartida.

A continuación, se describen las principales oportunidades de mejora mencionadas repetitivamente en la literatura y contenido web consultado.

7.3.1. Conectividad

La problemática que más se resaltó en la revisión de contenido realizada fue la limitada conectividad en muchas regiones rurales de Colombia. Para la transición a una era digital del sector agropecuario es esencial el acceso a internet de alta calidad, con el fin de que los productores puedan aprovechar las herramientas digitales como los sensores IoT y las plataformas de análisis de datos.

Sin embargo, donde se encuentra la mayor concentración de pequeños cafeteros es justamente en áreas con escasa cobertura de red y por esta razón, se convierte en una necesidad imprescindible, invertir en infraestructura digital para que los cultivadores puedan adoptar la A4.0 de manera efectiva. De acuerdo con el Ministerio de Tecnologías de la Información y las

Comunicaciones de Colombia (2023), esta infraestructura digital es esencial para implementar tecnologías como IoT, que son fundamentales para la Agricultura 4.0.

7.3.2. Educación

El sector agropecuario se ha caracterizado por ser un entorno de conocimiento empírico, por lo que los productores aún desconocen muchas de las tecnologías emergentes y cómo pueden beneficiarse de ellas.

Según Giraldo (2020), los caficultores necesitan estar capacitados para poder aprovechar al máximo las herramientas digitales. La educación en el uso de sensores, Big Data y las demás tecnologías digitales, facilita su adopción y correcta implementación. La falta de formación es una barrera importante y por ello existe la oportunidad para diseñar programas de capacitación enfocados en el uso de tecnologías digitales, una formación que no sólo se enfoque en lo técnico sino también en que se dé a conocer el impacto positivo que tienen estas herramientas en la productividad y la sostenibilidad de sus negocios.

7.3.3. Políticas públicas y financiamiento

Así como el desconocimiento de las tecnologías de agricultura 4.0 es un impedimento para en el proceso de implementación, el acceso limitado a financiamiento también es una dificultad crítica que no permite la compra de equipos y de inversión en las herramientas digitales.

Las políticas públicas desempeñan un papel clave en la creación de un marco normativo y en el desarrollo de estrategias gubernamentales que apoyen la transición hacia la Agricultura 4.0.

Estas pueden incluir incentivos fiscales para la adopción de nuevas tecnologías, programas de financiamiento para pequeñas y medianas empresas caficultoras y la promoción de alianzas entre el sector privado y las instituciones académicas para formar a los agricultores en el uso de nuevas herramientas.

Según Tovar-Quiroz (2023), la creación de proyectos favorables es vital para reducir la brecha de acceso a tecnologías en el sector agrícola, por lo que el desarrollo de políticas públicas que incentiven a los caficultores, como subsidios o líneas de crédito accesibles, puede ser un impulso para la transformación del agro en términos digitales, económicos, productivos y sociales.

7.3.4. Colaboración

La adopción de tecnologías avanzadas puede ser costosa para los pequeños productores que no cuentan con los recursos suficientes de inversión. Para contrarrestar este inconveniente, se pueden promover iniciativas de cooperación entre caficultores, asociaciones, instituciones y empresas, de modo que se comparta el acceso a equipos y plataformas digitales, distribuyendo los costos y maximizando los beneficios, ya no sólo para un productor sino para un grupo completo.

De acuerdo con Pardo-Pardo & Cuervo-Bejarano (2023), la colaboración facilita el acceso a tecnologías de precisión, ya que los agricultores pueden compartir equipos costosos como sensores de campo y drones, sin tener que pagar en su totalidad el valor de las herramientas digitales. Además, la colaboración mejora la cohesión del sector y permite la creación de redes de apoyo, lo que incrementa la eficiencia y reduce el estrés económico asociado a la transición

tecnológica. Así mismo, la cooperación entre el sector público y privado fomenta el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas que pueden adaptarse mejor a las necesidades de los caficultores.

7.4. Guía informativa

En el Apéndice A de este trabajo de investigación está incluida una guía informativa dirigida a los pequeños productores de café, con el objetivo de proporcionar una visión clara sobre los beneficios que la agricultura 4.0 puede traer para sus cultivos. Esta, sintetiza los hallazgos de la investigación, abordando de manera práctica las tecnologías emergentes como sensores IoT, Big Data, Blockchain y su aplicabilidad en la producción de café.

Además, también se exponen una serie de recomendaciones prácticas para facilitar la adopción como empezar con tecnologías de bajo costo, fomentar la colaboración entre productores, participar en programas de capacitación y mantenerse al tanto de las iniciativas del gobierno.

A través de un lenguaje accesible y explicaciones prácticas, se busca facilitar la transición hacia una agricultura digitalizada que sea más eficiente, sostenible y competitiva en el contexto global. Con base en esto, la guía está diseñada para promover el conocimiento sobre la Agricultura 4.0 y para ser una breve orientación en la transición a las producciones cafeteras digitales, en el contexto colombiano.

8. Artículo Publicable

El artículo se encuentra en el Apéndice B y busca presentar la revisión sistemática y el análisis de contenido web realizados sobre la implementación de Agricultura 4.0 en el sector cafetero, enfocándose en los pequeños productores en Colombia.

A través del formato establecido para publicación en la Revista de Ciencias de Administración y Economía (Retos), el artículo examina cómo tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data, Inteligencia Artificial (IA) y los sensores inteligentes pueden mejorar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad en la producción de café. Además, aborda los desafíos relacionados con la falta de infraestructura, la capacitación limitada y el acceso restringido a financiamiento.

9. Conclusiones

La agricultura 4.0 es un conjunto de herramientas que posibilitan una mejor preparación al enfrentar desafíos constantes de los cultivos como la variabilidad climática, el manejo de plagas, enfermedades y la necesidad de optimizar el uso de recursos limitados. La adopción de tecnologías digitales avanzadas representa una gran oportunidad de crecimiento y desarrollo para el sector cafetero colombiano, en términos de eficiencia, sostenibilidad y competitividad.

A través de sensores IoT, Big Data e Inteligencia Artificial, la gestión de los cultivos se transforma, facilitando el monitoreo constante y proporcionando información en tiempo real sobre las condiciones del suelo y la salud de las plantas. Este acceso a datos precisos es valioso para los agricultores, quienes pueden tomar decisiones oportunas e informadas en cuanto a las aplicaciones de fertilizantes, agroquímicos y hasta de los requerimientos de agua. Como resultado, se reducen

los desperdicios y los costos de producción, lo que impacta significativamente a nivel financiero y genera atracción por lo negocios del agro, pero también es favorecedor para el medio ambiente, un aspecto esencial en el contexto global actual, que exige prácticas agrícolas más responsables.

La trazabilidad proporcionada por el Blockchain y los sistemas de gestión y analítica de datos, permiten a los productores certificar la calidad de su café a lo largo de toda la cadena de suministro. Esta transparencia no sólo fortalece la confianza del consumidor, sino que además abre puertas a mercados internacionales y promueve la obtención de mejores precios, que para pequeños productores es una ventaja indiscutible.

Los beneficios que brinda la agricultura 4.0 para un cafetero colombiano son muy amplios, sin embargo, no es desconocido que la transición hacia el uso de estas tecnologías enfrente barreras en infraestructura, educación y apoyo gubernamental e institucional. Especialmente en las zonas rurales, donde se encuentra la mayoría de pequeños productores, existe la limitación en el acceso a internet y con ello, a las plataformas digitales necesarias para monitorear los cultivos. Además, la brecha de conocimiento y falta de capacitación son obstáculos que reducen el interés por aprovechar al máximo los desarrollos disponibles, que pueden facilitar y mejorar las producciones agrícolas.

La transformación digital del agro es un proceso en desarrollo que, si se gestiona adecuadamente, puede posicionar al café colombiano como un referente mundial en calidad, sostenibilidad y eficiencia productiva. La clave para su éxito radica en cerrar la brecha digital mediante proyectos que fomenten el acceso a formación, financiamiento y colaboración entre productores, para garantizar que las herramientas tecnológicas sean más accesibles para todos, sin importar el tamaño de las producciones.

10. Recomendaciones

Dado que los pequeños productores de café son una parte fundamental de la agricultura colombiana, es necesario realizar investigaciones más profundas donde se aborde la viabilidad económica de la implementación de tecnologías de agricultura 4.0. Esto incluye el análisis de los costos de implementación a detalle, los retornos de inversión a corto y largo plazo y, el acceso a financiamiento adecuado para los agricultores.

A medida que la tecnología evoluciona rápidamente también la investigación debe hacerlo, por lo que se debe explorar la integración de tecnologías emergentes en toda la amplitud del sector y cómo éstas se pueden utilizar en conjunto para optimizar la gestión desde los cultivos más destacados del país hasta todas las demás producciones agropecuarias.

De igual manera, es importante centrar futuras investigaciones en el diseño de programas de capacitación adaptados a los diferentes actores en la cadena productiva del agro, en los que se traten aspectos técnicos relacionados con las herramientas y con la adaptación cultural y la accesibilidad de los mismos. En este punto, se puede aprovechar para desarrollar plataformas digitales que incluyan formación y orientación para combinarlas con capacitación presencial en el uso de las tecnologías.

Referencias

- Adrian, R., & Teran, Y. (n.d.). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL CARRERA DE INGENIERÍA DE COMPUTACIÓN Revisión sistemática de literatura sobre el internet de las cosas enfocada a la agricultura de precisión. From <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27877>
- Agronegocios. (2024). *La cosecha histórica de 13,9 millones de sacos de café en 2024 significó \$16 billones*. Agronegocios. <https://www.agronegocios.co/agricultura/la-cosecha-historica-de-13-9-millones-de-sacos-de-cafe-en-2024-significo-16-billones-4033004>
- Albuquerque, L. D., & Guedes, E. B. (2024). Coffee Plant Leaf Disease Detection for Digital Agriculture. *Journal on Interactive Systems*, 15(1), 220–233. <https://doi.org/10.5753/jis.2024.3804>
- Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas (ACIS). (2021). *Agro 4.0: El programa del MinTIC y el C4IR.CO que busca mejorar la productividad del sector*. Tomado de: <https://acis.org.co/portal/content/noticiasdelsector/agro-40-el-programa-del-mintic-y-el-c4irco-que-busca-mejorar-la-productividad-del-sector>
- Fagundes, R. B., & Bolfe, É. L. (2022). Diagnosis about the perspectives of precision applications of coffee growing technologies in municipalities of Bahia, Brazil. *Coffee Science*, 17. <https://doi.org/10.25186/v17i.2034>

Fedecafeteros. (2025). *Producción de 14,79 millones de sacos de café, no se registraba desde hace*

29 años en el periodo marzo a febrero. Tomado de:

<https://federaciondefecafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-1479-millones-de-sacos-de-cafe-no-se-registraba-desde-hace-29-anos-en-el-periodo-marzo-a-febrero/>

Forbes. (2025). *La economía creció 1.7% en 2024, impulsada por la agricultura y los servicios,*

según el DANE. Tomado de: <https://forbes.co/2025/02/17/economia-y-finanzas/la-economia-crecio-17-en-2024-impulsada-por-la-agricultura-y-los-servicios-segun-el-dane>

Tomado de: <https://forbes.co/2025/02/17/economia-y-finanzas/la-economia-crecio-17-en-2024-impulsada-por-la-agricultura-y-los-servicios-segun-el-dane>

Friha, O., Ferrag, M. A., Shu, L., Maglaras, L., & Wang, X. (2021). *Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies.*

IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 8(4), 718–752.

<https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003925>

Giraldo, A. (2020). *Tan cerca y tan lejos de la agricultura 4.0 en Colombia.* Tomado de:

<https://www.eafit.edu.co/investigacion/noticias/Paginas/tan-cerca-y-tan-lejos-de-la-agricultura-4-0-en-colombia.aspx>

Hidalgo, F., Birkenberg, A., Daum, T., Bosch, C., & Quiñones-Ruiz, X. F. (2024). How do coffee farmers engage with digital technologies? A capabilities perspective. *Agriculture and Human Values.*

<https://doi.org/10.1007/s10460-024-10574-3>

Ignacio Rodríguez Molano, J., Andrea Montoya Alvarez, Y., & Emiro Contreras Bravo, L. (2022).

COLOMBIAN AGRICULTURE: APPROACHING AGRICULTURE 4.0. AGRICULTURA COLOMBIANA: APROXIMACIÓN A LA AGRICULTURA 4.0.
<https://repository.udistrital.edu.co/items/bfcb4f8e-4662-45bd-9301-346ddb9941/full>

Impacto TIC. (2023). *Agricultura 4.0 en Colombia: Oportunidades y desafíos*. Tomado de:

<https://impactotic.co/tecnologia/agricultura-4-0-en-colombia-oportunidades-y-desafios/>

Jose, S. (2014). Innovation in agriculture: a key process for sustainable development Institutional position paper.

Lasso, E., Motisi, N., Avelino, J., & Corrales, J. C. (2021). FramePests: A Comprehensive Framework for Crop Pests Modeling and Forecasting. *IEEE Access*, 9, 115579–115598.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104537>

La República. (2025). *Valor de cosecha del café colombiano llegó a \$19 billones en los últimos 12 meses*. Tomado de: <https://www.larepublica.co/economia/el-valor-de-la-cosecha-del-cafe-colombiano-llego-a-19-billones-en-los-ultimos-12-meses-4085035>

Leibovich, J. (2025). *El resurgir de la caficultura colombiana en 2024*. Tomado de: <https://politicaspUBLICAS.com.co/el-resurgir-de-la-caficultura-colombiana-en-2024/>

Lioutas, E. D., Charatsari, C., & de Rosa, M. (2021). Digitalization of agriculture: A way to solve the food problem or a trolley dilemma? *Technology in Society*, 67, 101744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101744>

Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2021). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322–4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>

Melo-Velasco, J. (2023). *DIGITAL AGRICULTURE' IMPLICATIONS FOR SMALL FARMERS: EVIDENCE FROM COLOMBIA*. <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/96993/MeloVelascoJennyResearch.pdf?sequence=1>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). *El café: Producto insignia de Colombia en el mundo*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/CafeProductoInsigniaColombiaMundo.aspx>

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2023). MinTIC invita a los caficultores del país a usar la tecnología para dinamizar la productividad en el campo. *Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia*.

<https://mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/327019:MinTIC-invita-a-los-caficultores-del-pais-a-usar-la-tecnologia-para-dinamizar-la-productividad-en-el-campo>

Montoya-Munoz, A. I., & Rendon, O. M. C. (2020). An approach based on fog computing for providing reliability in iot data collection: A case study in a colombian coffee smart farm. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(24), 1–16. <https://doi.org/10.3390/app10248904>

Naciones Unidas. (2023). *Hambre cero – Objetivo de Desarrollo Sostenible 2*. Tomado de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>

Oliver Wyman. (2018). *Agriculture 4.0 – The future of farming technology*. Tomado de: <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2018/feb/agriculture-4-0--the-future-of-farming-technology.html>

Panggabean, Y. B. S., Arsyad, M., Nasaruddin, & Mahyuddin. (2023). The Future of Coffee, Digital Technology and Farmer's Income. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, *18*(2), 411–418. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180209>

Pardo-Pardo, A. M., & Cuervo-Bejarano, W. J. (2023). Assessing the impact of emerging technologies on sustainable fruit production: A systematic review of the literature. *Agronomia Colombiana*, *41*(3). <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v41n3.107255>

Perez-Silva, R., & Campos, J. (2021). Agriculture 4.0? Studying the evidence for automation in Chilean agriculture. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 48(3), 233–247. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2339>

Rodríguez, J. P., Montoya-Munoz, A. I., Rodríguez-Pabon, C., Hoyos, J., & Corrales, J. C. (2021). IoT-Agro: A smart farming system to Colombian coffee farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106442>

Semana. (2023). Agricultura 4.0: Así transforman las nuevas tecnologías la industria agrícola en Colombia. Tomado de: <https://www.semana.com/foros-semana/articulo/agricultura-40-asi-transforman-las-nuevas-tecnologias-la-industria-agricola-en-colombia/202311/>

Sott, M. K., Furstenau, L. B., Kipper, L. M., Giraldo, F. D., López-Robles, J. R., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Precision Techniques and Agriculture 4.0 Technologies to Promote Sustainability in the Coffee Sector: State of the Art, Challenges and Future Trends. *IEEE Access*, 8, 149854–149867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016325>

Superintendencia de Industria y Comercio. (2022). *Café: Un sector de oportunidad para las tecnologías de la Industria 4.0*. Tomado de: <https://www.sic.gov.co/content/cafe-un-sector-de-oportunidad-para-las-tecnologias-de-la-industria-40>

Syam Kishor, K. S., Manju, G., Thomas, S., & Binson, V. A. (2024). PRECISION CROP PREDICTION USING IOT-ENABLED SOIL SENSORS AND MACHINE LEARNING. *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, 10(49), 65–70. <https://doi.org/10.5935/jetia.v10i49.1219>

Tovar-Quiroz, A. D. (2023). Agricultura 4.0: uso de tecnológicas de precisión y aplicación para pequeños productores. *Informador Técnico*, 87(2). <https://doi.org/10.23850/22565035.5536>

Universidad del Magdalena. (2024). *UNIMAGDALENA y Fedecafeteros trabajan por incluir tecnología 4.0 en la producción del café*. Tomado de: <https://www.unimagdalena.edu.co/presentacionPublicacion/VerNoticia/323159>

World Economic Forum. (2023). *Markets of tomorrow report 2023: Turning technologies into new sources of global growth*. Tomado de: <https://www.weforum.org/publications/markets-of-tomorrow-report-2023-turning-technologies-into-new-sources-of-global-growth/>