

Pensamientos del Agro

Serie de documentos de trabajo

# Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia

Juan Ovalle Másmela  
Felipe Romero-Perdomo  
Claudia Uribe Galvis





Pensamientos del Agro

Serie de documentos de trabajo

# Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia

Juan Ovalle Másmela  
Felipe Romero-Perdomo  
Claudia Uribe Galvis

Mosquera, septiembre 2023

La elaboración de este documento fue gestionada por Juan Camilo Ovalle Másmela y Felipe Romero Perdomo, profesionales del Departamento de Articulación Institucional de Agrosavia, y contó con la supervisión de Claudia Uribe, jefe del Departamento de Articulación Institucional, en el marco de las actividades del Observatorio de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector agropecuario colombiano (OCTIAGRO).

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)  
Centro de Investigación Tibaitatá. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, Cundinamarca. Código postal 250047, Colombia.

**Citación sugerida:** Ovalle Másmela, J., Romero-Perdomo, F., Uribe Galvis, C. (2023). Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

DOI: [10.21930/agrosavia.estudiodevigilancia.2023.2](https://doi.org/10.21930/agrosavia.estudiodevigilancia.2023.2)

Línea de atención al cliente: 018000121515  
[atencionalcliente@agrosavia.co](mailto:atencionalcliente@agrosavia.co)  
<http://www.agrosavia.co>



[https://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](https://co.creativecommons.org/?page_id=13)

**Cláusula de responsabilidad:** AGROSAVIA no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>7</b>
<b>Tecnologías emergentes para el sector agropecuario</b> .....	<b>10</b>
<i>Evolución y desarrollo tecnológico del sector agrícola</i> .....	10
<i>Herramientas tecnológicas y digitales de la Agricultura 4.0 y 5.0</i> .....	13
<i>Grandes datos</i> .....	18
<i>Inteligencia artificial</i> .....	22
<i>Aprendizaje automático</i> .....	25
<i>Aprendizaje profundo</i> .....	26
<i>Internet de las cosas</i> .....	27
<i>Computación en la nube y computación perimetral</i> .....	30
<i>Cadena de bloques</i> .....	32
<i>Realidad virtual y realidad aumentada</i> .....	35
<i>Metaverso</i> .....	37
<i>Nanotecnología</i> .....	38
<i>Panorama de tecnologías 4.0 y 5.0 en Colombia</i> .....	41
<i>Normativa y política</i> .....	49
<i>Perspectivas del sector</i> .....	51
<i>Barreras para la implementación</i> .....	53
<b>Conclusiones</b> .....	<b>54</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>55</b>

## Tablas

**Tabla 1.** Tecnologías emergentes en la Agricultura 4.0 y 5.0

**Tabla 2.** Publicaciones más citadas en el campo de la investigación de las tecnologías emergentes para el sector agropecuario.

**Tabla 3.** Softwares basados en IA ofrecidos en el mercado para el sector agrícola

**Tabla 4.** Aplicaciones de tecnologías 4.0 y 5.0 para el sector agropecuario en Colombia.

**Tabla 5.** Ofertas tecnológicas generadas por las instituciones del sector agropecuario.

**Tabla 6.** Proyectos de Agrosavia relacionados con IA.

## Figuras

**Figura 1.** Desarrollo de las revoluciones tecnológicas en el sector agrícola.

**Figura 2.** Producción científica anual del campo de investigación de tecnologías emergentes para el sector agrícola indexada en la base de datos de Scopus.

**Figura 3.** Producción científica total de las tecnologías reportadas dentro del campo de investigación de tecnologías emergentes para el sector agrícola en Scopus.

**Figura 4.** Producción científica por países del campo de investigación de tecnologías emergentes agrícolas indexada en Scopus.

**Figura 5.** Subcategorías de la IA.

**Figura 6.** Aplicación de diversas tecnologías de la información y la comunicación en la cadena de bloques en el flujo de datos e información sobre la agricultura.

**Figura 7.** Uso de la nanotecnología en diferentes etapas de la agricultura.

## Autores

### **Juan Camilo Ovalle**

Correo: [jovallem@agrosavia.co](mailto:jovallem@agrosavia.co)

ORCID: 0000-0002-7024-0849

Profesional de Planeación y Cooperación Institucional de Agrosavia. Bacteriólogo con énfasis en Microbiología Ambiental, y estudios en Gerencia de Calidad de Laboratorios en Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Magister en Administración Pública de la Escuela Superior de Administración Pública-ESAP. Su experiencia inicialmente relacionada con Investigación básica y aplicada en biotecnología asociada con Sistemas de producción Ganadera. Actualmente trabaja en temáticas vinculadas con la Gestión de Conocimiento y gestión de información de Ciencia, tecnología e Innovación Sectorial y extensión agropecuaria con las plataformas de Soporte al SNIA Siembra, Linkata y BAC.

### **Felipe Romero Perdomo**

Correo: [fromerop@agrosavia.co](mailto:fromerop@agrosavia.co)

ORCID: 0000-0002-4277-1925

Máster en Proyectos de Desarrollo Sostenible de la Universidad EAN y Microbiólogo Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana que se desempeña en el Departamento de Articulación Institucional de Agrosavia. Tiene más de 10 años de experiencia en investigación, transferencia de tecnología y gestión de proyectos en bioeconomía y sostenibilidad para instituciones privadas, públicas y sin fines de lucro. Es apasionado por el nexo ciencia-tecnología-innovación, la bioprospección de la biodiversidad, los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la economía circular, las bioindustrias, la seguridad alimentaria y el cambio climático. Actualmente apoya iniciativas interdisciplinarias de impacto nacional del Sistema Colombiano de Innovación Agropecuaria (SNIA) y del Observatorio de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector agropecuario colombiano (OCTIAGRO).

### **Claudia Patricia Uribe Galvis**

Correo: [curibe@agrosavia.co](mailto:curibe@agrosavia.co); [uribegalvis@gmail.com](mailto:uribegalvis@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-8689-2860

Zootecnista de la Universidad Nacional de Colombia, M.Sc en Desarrollo Rural, de la Pontificia Universidad Javeriana. Experiencia en políticas públicas sectoriales y de la ciencia, la tecnología y la innovación en su formulación, seguimiento y evaluación. Especialista en estudios prospectivos y análisis estratégicos. Actualmente, se desempeña como jefe del Departamento de Articulación Institucional Dirección de Planeación, de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA); desde donde se coordina el soporte de Agrosavia al Sistema Nacional de Innovación, los sistemas de información en CTI para el sector agropecuario, y el Observatorio de CTI para el sector agropecuario colombiano. [OB]

# Introducción

La agricultura juega un rol vital en el desarrollo de la sociedad al ser un componente clave en el sector económico para el crecimiento del producto interno bruto de la mayoría de los países (Abioye et al., 2020). Su participación en la productividad económica mundial es del 6,4%, posicionándose en nueve países como el sector dominante (Pathan et al., 2020). La agricultura es la base para la seguridad alimentaria, aliviando el hambre de las comunidades en general al garantizar un suministro de alimentos sostenibles, inocuos y nutritivos (Nicholson et al 2020). Al mismo tiempo, la agricultura es un factor determinante para la salud del planeta, ya que influye directamente en la fertilidad del suelo, en las emisiones de los gases efecto invernadero, en la deforestación y en la pérdida de biodiversidad (Clark et al 2022). Esto ha conllevado al desarrollo y la innovación tecnológica en el sector que han permitido modernizar las cadenas productivas agropecuarias (da Silveira et al 2021).

Diversos países en el mundo, que son potencia agrícola, como Estados Unidos, China y Brasil, han enfocado sus esfuerzos e inversiones en las tecnologías digitales emergentes para que apoyen a sus unidades de producción agropecuaria (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). En Colombia, la agricultura representa uno de los principales sectores de la economía; no obstante, el uso agrícola del suelo es tan sólo del 13,5% de 39,2 millones de hectáreas con potencial agrícola, donde menos del 10% de las unidades de producción agropecuaria establecidas cuenta con algún tipo de activo de tecnologías de información y comunicación (dispositivos móviles, computadores, tabletas, geo localizadores), y solo el 1,7% tiene acceso a Internet (Rico, 2022; DANE, 2019).

El proceso continuo de transformación de la agricultura ha sido impulsado principalmente por la Revolución Industrial y la Sociedad desde 1780 hasta la actualidad. Este proceso se ha distribuido en 5 épocas o periodos en el tiempo (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). La primera es conocida como “Mecanización 1.0” e introdujo la infraestructura de producción industrial basada en agua y vapor. La segunda se conoce como “Electrificación 2.0” y consistió en la producción en masa mediante energía eléctrica y líneas de montaje. La tercera es llamada la “Automatización 3.0”, la cual expuso la producción automatizada



debido al auge de la ingeniería electrónica, las telecomunicaciones y las computadoras. La cuarta, iniciado desde 2011, es la “Digitalización 4.0” que se enfoca al uso de sistemas físicos cibernéticos en dispositivos conectados para automatizar aún más los procesos. La quinta época, que está de auge al empezar en el 2021, es la “Personalización 5.0” y busca la interdependencia entre el hombre y la máquina mediante la computación cognitiva y la inteligencia humana, es decir que busca que las maquinas aprendan, piensen y tomen decisiones que apoyen el desarrollo productivo.

En la actualidad, se están evidenciando los avances de la Agricultura 4.0, la cual ha mostrado un despliegue de herramientas digitales que ofrece nuevas estrategias para maximizar la funcionalidad de la agricultura de precisión y promover predicciones, y la transición hacia la Agricultura 5.0, que tiene como meta garantizar el funcionamiento autónomo de los sistemas productivos mediante asistentes robots que se encarguen de actividades mecánicas para que el ser humano se desempeñe con sus capacidades cognitivas y de la razón (Fraser & Campbell, 2019; Abbasi et al 2022; Misra et al 2020). Cabe aclarar que el rol del ser humano en la revolución 5.0 está más asociado con la creación y la innovación, mientras que el de la maquina con la toma de decisiones en lo operativo y la ejecución de acciones relacionadas con los sistemas productivos.

A pesar del desarrollo y la innovación en el sector tecnológico y digital, la ausencia tecnológica en el campo colombiano es preocupante, limitando tanto el crecimiento del sector agropecuario como el cumplimiento de estrategias nacionales e internacionales como la Misión para la Transformación del Campo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Abuchaibe & Gómez, 2021). Asimismo, no se estaría aprovechando el potencial de estas tecnologías para fortalecer la toma de decisiones en la gobernanza y la gestión sectorial (Orjuela Santamaria & Economista, 2021). Esta realidad ha generado la necesidad de diseñar políticas innovadoras enfocadas al desarrollo tecnológico agrícola, la cual deben estar alineadas con el panorama actual del país sin dejar atrás el fortalecimiento de capacidades digitales que también impiden la apropiación y uso de nuevas tecnologías.

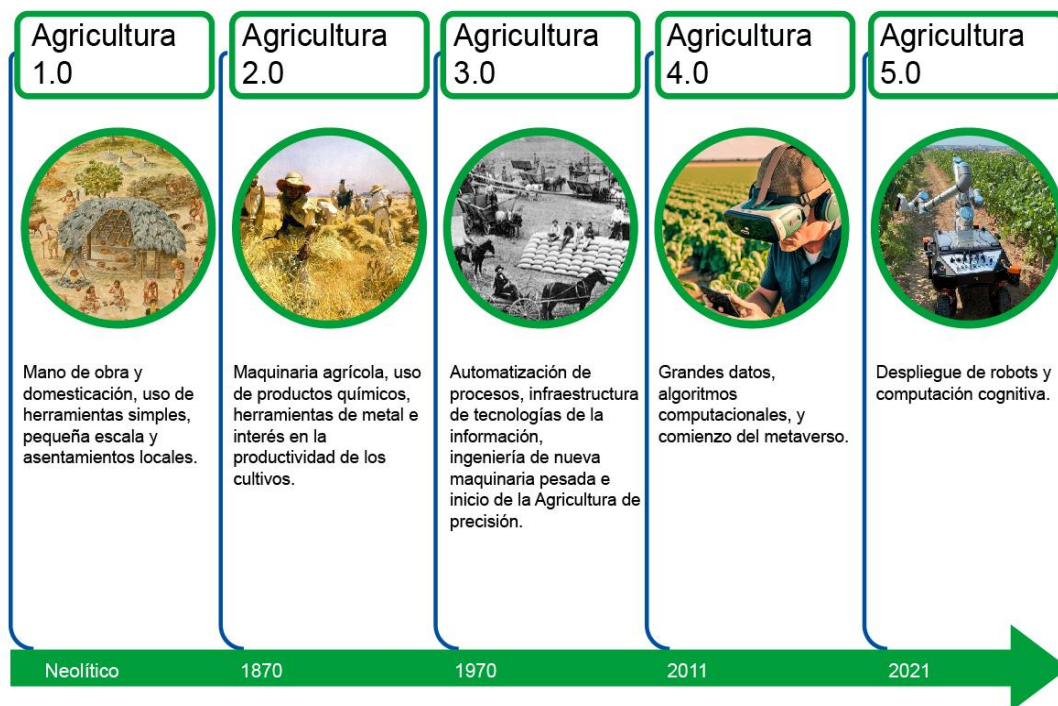
El presente libro de análisis aborda el uso potencial y el desarrollo de tecnologías emergentes para la agricultura en Colombia como la inteligencia artificial (IA), el internet

de las cosas (IoT), el aprendizaje automático, blockchain, big data, la realidad aumentada, la computación en la nube, nanotecnología, entre otros. Todo lo anterior producto de una revisión de publicaciones de investigación, informes gubernamentales, y reportes de organizaciones privadas y sin ánimo de lucro que se llevó a cabo para describir los avances asociados con dichas tecnologías desde su concepto, aplicaciones, limitaciones y tendencias globales. Además, se realizó una evaluación cualitativa del avance nacional con base en aspectos de investigación, normativos, políticos, económicos y sociales. Por lo tanto, se consolida un insumo como herramienta que contribuya a la actualización y toma de decisiones de las coyunturas del agro colombiano.

# Tecnologías emergentes para el sector agropecuario

## Evolución y desarrollo tecnológico del sector agrícola

La definición de Revolución Industrial está asociada con los avances tecnológicos que se introducen como nuevos mecanismos de transformación de la sociedad. En el transcurso del tiempo se han desarrollado diferentes revoluciones pasando de la revolución 1.0 hasta la 5.0, supeditando el progreso de los sectores económicos (Taj & Zaman, 2022). La agricultura es uno de los sectores que se ha influenciado de las cinco revoluciones mediante la adopción de sus tecnológicas (Martos et al 2021); Es así como en la Figura 1 se puede observar la evolución tecnológica de la agricultura.



**Figura 1.** Desarrollo de las revoluciones tecnológicas en el sector agrícola.

Fuente: Martos et al 2021

La Agricultura 1.0 describe la práctica agrícola desde la antigüedad hasta el siglo XIX; esta se basó en el trabajo manual, arraigado en formas tradicionales como la fuerza de animales, la implementación de herramientas producto de la introducción del hierro a la

fabricación de estos elementos, el descubrimiento de la rotación de cultivos, entre otros. Así mismo, esta fue implementada a pequeña escala local y entorno a asentamientos humanos (Vemuri, 2021).

La Agricultura 2.0 aconteció durante finales del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX; se caracterizó por el uso de maquinaria a vapor, herramientas agrícolas de metal más refinado, y agroquímicos; estos últimos asociados con el descubrimiento de Von Liebig en relación con la necesidad nutricional de las plantas en materia de nitrógeno, fósforo y potasio para el crecimiento, desarrollo y rendimiento vegetal. Bajo este contexto, la ejecución de las actividades agrícolas apoyada en dichas tecnologías demandaba menos riesgos al trabajador y los animales, además de un mejor uso del tiempo en relación producción, fortaleciendo la importancia de la productividad de los cultivos (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

La Agricultura 3.0 empezó desde la segunda mitad del siglo XX e introdujo la automatización de procesos, mediante infraestructura de tecnología de la información relacionada con Internet y software especializados. Durante este periodo se impulsó la ingeniería genética para la generación de nuevas variedades. También se observó un crecimiento continuo de la producción en masa mediante la adopción de combustibles fósiles en las maquinarias y la nueva ingeniería pesada; ejemplo de ello es el uso de herramientas agrícolas modernas como el tractor, la cosechadora, entre otros (Martos et al 2021). La finalización de la Agricultura 3.0 estuvo marcada con el inicio de la Agricultura de Precisión.

La Agricultura de Precisión está representada por la implementación de la tecnología de la información para buscar un manejo más efectivo y eficiente de la variabilidad de suelos y cultivos en un área determinada. Esta involucra el uso de sistemas de posicionamiento global y de otros medios electrónicos para obtener datos del sistema productivo (Hang et al 2020). El contexto de la Agricultura de Precisión podría ser referenciado como la transición entre la Agricultura 3.0 y la Agricultura 4.0. Bajo este contexto, la Agricultura de Precisión se vio beneficiada por dicha transición al adoptar nuevas herramientas y por ende fortalecer su uso en las actividades del productor (Kong et al 2019).

La Agricultura 4.0 es un periodo más reciente en la historia de la agricultura; este término fue adoptado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO, sugiriéndolo en virtud de una agricultura que vincula diversas innovaciones para garantizar la producción agrícola (Ojeda-Beltrán, 2022). La Agricultura 4.0, también conocida como Digital Farming o Smart Farming, lleva aproximadamente una década de desarrollo y está basada en la digitalización de la gestión agrícola a través de dispositivos y plataformas inteligentes para llevar trazabilidad de los datos y mejorar aún más la precisión de los procesos automatizados (da Silveira et al 2021).

Ejemplos prácticos de la Agricultura 4.0 son los drones que tienen sensores y recopilan datos del suelo para efectos de una mejor fertilización o los sensores ambientales que permiten identificar en tiempo real las condiciones de temperatura, humedad, entre otros parámetros del suelo y el ambiente. En la producción ganadera un ejemplo son los microchips utilizados en el ganado para llevar trazabilidad de cada animal en variables como vacunación, edad y crías.

Las tecnologías 4.0 están facilitando la toma de decisiones estratégicas y operativas, como también la identificación de problemas o imprevistos difíciles de notar mediante inspecciones visuales. Asimismo, la capacidad de interoperabilidad, es decir, la adaptación de estas tecnologías a varios sistemas está mostrando un impacto positivo en la productividad y rentabilidad del sector agrícola (Himesh, 2018). En cuanto a la voluntad de adoptar herramientas modernas en la agricultura, los agricultores jóvenes han reflejado mayor disposición que los mayores, ya que los primeros pueden respaldar la experiencia que están adquiriendo con nuevas herramientas inteligentes que brindan información clave (Vemuri, 2021). Para facilitar inicialmente el desarrollo Agrícola 4.0 en la transformación de los sistemas alimentarios tradicionales, es fundamental comprender las limitaciones y riesgos que se deben enfrentar para que todos los países se beneficien de su potencial (Hinson et al, 2019). Aunque algunos estudios describen beneficios de la Agricultura 4.0 para las personas, la productividad y el planeta, hay una necesidad de establecer métricas que definan cómo estas tecnologías impactan en la cadena de producción agrícola (da Silveira et al 2021).

La Agricultura 4.0 sigue en expansión y maduración de algunas de sus tecnologías; sin embargo, ya se está hablando de la Agricultura 5.0 y los alcances y aplicaciones que puede tener. El despliegue de la Agricultura 5.0 está basado en una interacción cognitiva entre el ser humano y la máquina que da relevancia a la gestión del conocimiento entre los diferentes actores (Martos et al, 2021). La revolución 5.0 se caracteriza por consolidar la manufacturación personalizada, contando con asistentes robots y empoderando al ser humano (Nahavandi, 2019). A diferencia de lo que se puede pensar con la masificación en la implementación de máquinas para la automatización de la producción, esta revolución en vez de relegar al hombre y eliminar puestos de trabajo, lo que busca es que éste revitalice su importancia en la industria, retirándolo de actividades que son mecánicas al ser humano y llevándolo al uso de sus capacidades cognitivas y de la razón (Taj & Zaman, 2022). Ejemplo de lo anterior es la mejora en la aplicación de la robótica a la agricultura debido a los algoritmos de alta precisión de la inteligencia artificial (Nahavandi, 2019). La Agricultura 5.0 se encuentra en la fase de desarrollo y, con el avance de la inteligencia artificial, se acelerará. Por lo tanto, la Agricultura 5.0 es un camino pavimentado para una agricultura más sostenible y eficiente en el futuro (Contreras-Medina et al, 2022).

## Herramientas tecnológicas y digitales de la Agricultura 4.0 y 5.0

El desarrollo tecnológico en el sector agropecuario en el marco de la Agricultura 4.0 y 5.0 ha permitido la generación de tecnologías y aplicaciones de todo tipo. Estas innovaciones asociadas con dispositivos y plataformas inteligentes son tecnologías emergentes y disruptivas que buscan acelerar el desarrollo tecnológico, social y económico. Entre estas tecnologías, se encuentra la inteligencia artificial, el internet de las cosas, el aprendizaje automático, cadena de bloques, grandes datos, la realidad aumentada, la computación en la nube, sistemas robóticos, entre otros (Tabla 1). Estas herramientas interactúan entre sí permitiendo la generación de nuevas estrategias en beneficio de los sistemas productivos agropecuarios, el fortalecimiento de capacidades de los actores, la investigación y la innovación a todo nivel sectorial.

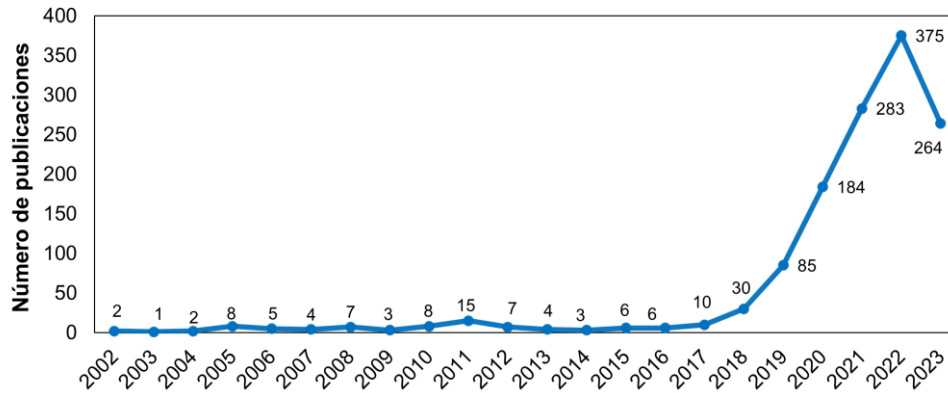
**Tabla 1.** Tecnologías emergentes en la Agricultura 4.0 y 5.0

Agricultura 4.0	Agricultura 5.0
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maduración de la Agricultura de Precisión.</li> <li>• Web 3.0.</li> <li>• Inicios aplicativos de la Inteligencia artificial</li> <li>• Internet de las cosas</li> <li>• Aprendizaje automático</li> <li>• Aprendizaje profundo</li> <li>• Cadena de bloques</li> <li>• Grandes datos</li> <li>• Computación en la nube</li> <li>• Realidad virtual y aumentada</li> <li>• Metaverso</li> <li>• Drones</li> <li>• Sensores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas robóticos.</li> <li>• Computación cognitiva</li> <li>• Impresión 4D</li> <li>• Biología sintética</li> <li>• Diseño de alimentos (carne y proteína artificial)</li> </ul>

Fuente: Saiz-Rubio & Rovira-Más (2020).

La tendencia científica<sup>1</sup> de las tecnologías emergentes para el agro muestra que cada vez están llamando más la atención de los investigadores (Figura 2). En la base de datos de Scopus, se registró la primera publicación en 2002. En el 2010 y 2019, se reportaron 8 y 85 publicaciones, respectivamente. El crecimiento sustancial de las publicaciones ocurrió en el 2020, con un aumento mayor al 100% respecto al 2019, pues se registraron 184 publicaciones. En el 2021, se generaron 283 publicaciones, mientras que, en el 2022, fueron 375. A la fecha, se han reportado 264 publicaciones en el 2023, lo que podría indicar que el número de publicaciones seguirá en aumento. En total, este campo de investigación exhibe 1312 publicaciones.

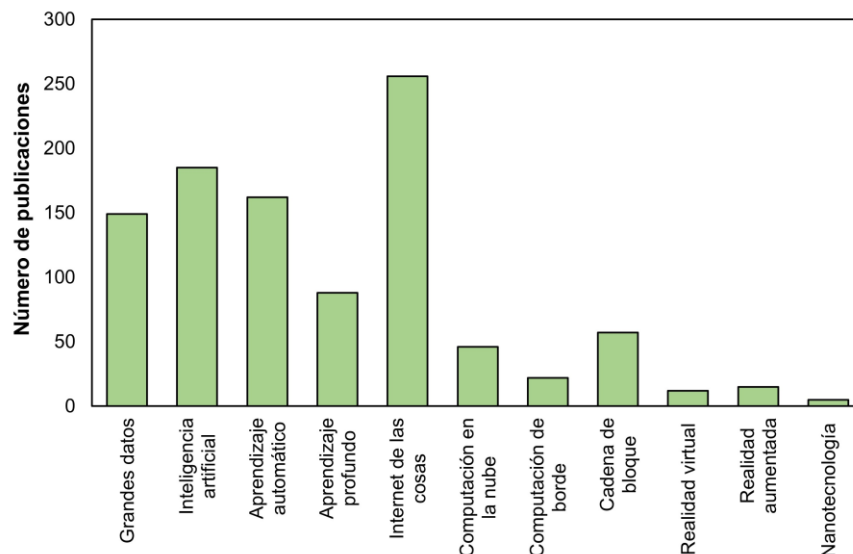
<sup>1</sup> Ecuación de búsqueda en Scopus: (TITLE-ABS-KEY ("agri\* 4.0" OR "digital agriculture" OR "agri\* 5.0")), Fecha de búsqueda 06 de septiembre 2023



**Figura 2.** Producción científica anual del campo de investigación de tecnologías emergentes para el sector agrícola indexada en la base de datos de Scopus.

Fuente: Elaboración propia con base a los resultados obtenidos en Scopus

Respecto a las tecnologías asociadas, la tendencia científica indica que el internet de las cosas es la más reportada, con 256 publicaciones (Figura 3). La inteligencia artificial, el aprendizaje automático y los grandes datos también se destacan con 185, 162 y 149 publicaciones. Le siguen el aprendizaje profundo y la cadena de bloques, los cuales superan las 50 publicaciones. La computación en la nube, computación de borde, realidad aumentada, realidad virtual y la nanotecnología presentan de 5 a 46 publicaciones.



**Figura 3.** Producción científica total de las tecnologías reportadas dentro del campo de investigación de tecnologías emergentes para el sector agrícola en Scopus.



Las 10 publicaciones más citadas de este campo de investigación presentaron una cantidad de citas que oscila entre las 201 a 500 y sus años de publicación son desde el 2018 al 2020 (Tabla 2). Estas publicaciones abordaron el panorama general de la Agricultura 4.0 y 5.0 en términos de tecnologías disponibles, impactos generados y desafíos de adopción. Además, se han desarrollado enfoques más específicos sobre las pequeñas y medianas empresas y la gestión de datos de cultivos. Abordajes alineados al ámbito social para gestionar la diversidad y la innovación responsable se han llevado a cabo para que sean consideradas en la futura agenda de investigación. Por último, se ha destacado notablemente el uso de la tecnología Blockchain sobre las cadenas de suministro de alimentos.

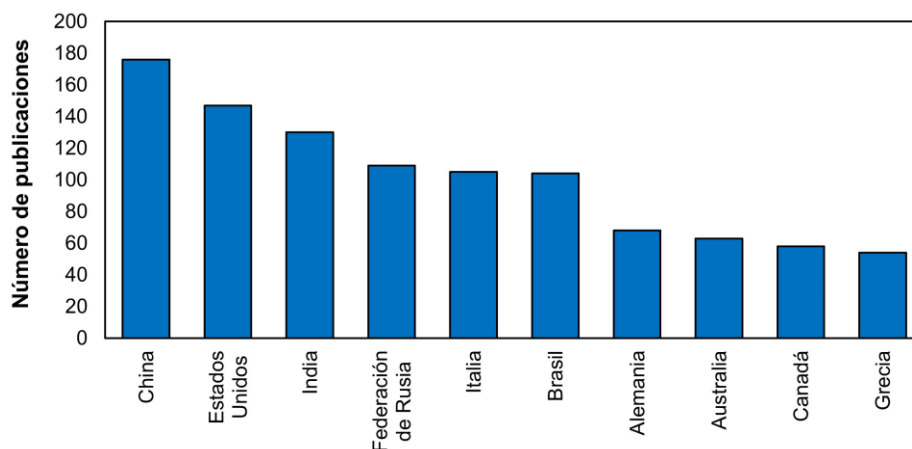
**Tabla 2.** Publicaciones más citadas en el campo de la investigación de las tecnologías emergentes para el sector agropecuario.

Ranking	Título de la publicación	Citaciones	Referencia
1	The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains	500	Kamilaris et al., 2019
2	A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda	484	Klerkx et al., 2019
3	From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management	333	Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020
4	Agri-food 4.0: A survey of the Supply Chains and Technologies for the Future Agriculture	304	Lezoche et al., 2020
5	Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming	267	Rose & Chilvers, 2018
6	Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges	256	Zhai et al., 2020
7	Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming	245	Shamshiri et al., 2018

8	Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?	235	Klerkx & Rose, 2020
9	From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges	215	Liu et al., 2020
10	Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs	201	Zambon et al., 2019

Fuente: Elaboración propia con base a los resultados obtenidos en Scopus.

El avance de la investigación en tecnologías emergentes agropecuarias está siendo impulsado por países de la mayoría de todos los continentes (Figura 4). China es el país líder con 176 publicaciones. La investigación en China se ha enfatizado en los procesos de transferencia de tecnologías de la industria 4.0 a la Agricultura 4.0, en la democratización agrícola digital, en la inmersión de dichas tecnologías en contextos urbanos y en desarrollar algoritmos mediante aprendizaje profundo para detectar aspectos relevantes en diversos cultivos como los frutos de las cerezas y los síntomas de la sequía en maíz (Gai et al., 2023; Jiang et al., 2022; Liu et al., 2020; Chen et al., 2020; Jia et al., 2012).



**Figura 4.** Producción científica por países del campo de investigación de tecnologías emergentes agrícolas indexada en Scopus.

Fuente: Elaboración propia con base a los resultados obtenidos en Scopus

Estados Unidos se ubica en el segundo lugar con 147 publicaciones. Su investigación se ha centrado en estrategias para que las grandes tecnologías lleguen a los pequeños agricultores, en impulsar una soberanía de datos agraria para la oportuna gobernanza e innovación y en desarrollar tecnologías robóticas para el control de malezas y la óptima identificación de enfermedades en los cultivos (Gao et al., 2023; Faxon, 2023; Hutchins & Hueth, 2023). Seguidamente, se encuentra India y la Federación de Rusia con 130 y 109 publicaciones, respectivamente. Italia y Brasil ocupan la quinta y sexta posición con un número de publicaciones superior a 100. Posteriormente, se ubica Alemania, Australia, Canadá y Grecia con un número de publicaciones entre 54 a 68.

Las temáticas de las publicaciones del 2023 denotan como proyecciones al campo de investigación que se estandaricen paquetes tecnológicos para el desarrollo de sistemas de agricultura inteligente que muestren ser diversificados y multifuncionales (Gour & Maurya, 2023; Wao & Wao, 2023). Además, se busca hacer que la patología vegetal y la respuesta al estrés abiótico sea algorítmicamente reconocible, como también que la productividad de cultivos sea predicha y optimizada (Balaska et al., 2023; Heimstädt, 2023). Por último, se plantea como reto transdisciplinario que la investigación sea la puerta para regular adecuadamente el uso de las tecnologías en el sector y para incrementar su implementación (Gil et al., 2023; Ibrahim & Truby, 2023). En los siguientes capítulos, se presenta en detalle las tecnologías más relevantes, sus aplicaciones en el sector y los retos y necesidades para su implementación en Colombia.

## Grandes datos

El concepto de grandes datos o big data está presente en muchos sectores económicos y la agricultura no es la excepción. La cantidad cada vez mayor de datos disponibles para la gestión agrícola hace necesaria la implementación de algún tipo de proceso automático para extraer información operativa a partir de datos masivos (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). El proceso de examinar los datos, para descubrir patrones ocultos, correlaciones desconocidas, tendencias del mercado, preferencias de los clientes y otra información útil

para entender cómo funciona en este caso el sector agropecuario se conoce como análisis de grandes datos (Abbasi et al 2022).

El uso de los grandes datos está asociado con la Agricultura 4.0, no obstante, su uso y aplicación trasciende este periodo y busca fortalecerse en la Agricultura 5.0. Es así como los grandes volúmenes de datos agrícolas que son generados por diversas organizaciones, áreas y fases o momentos relacionadas con la producción agrícola se han venido recopilando de la siguiente manera: (i) campos agrícolas donde se realiza la captura de datos a través de sensores terrestres, vehículos aéreos y terrestres que utilizan cámaras y sensores especiales; (ii) organismos gubernamentales donde la captura se realiza a partir de informes y reglamentos; (iii) organizaciones privadas donde la información se obtiene a través de servicios web en línea; (iv) agricultores o productores donde la información se extrae en forma de conocimiento tácito o explícito a través de encuestas; y (v) de redes sociales (Chi et al 2016).

Los datos que permiten hacer un análisis grandes datos pueden ser de diversos tipos. Los datos pueden ser ambientales como tiempo, clima, y nivel de humedad. También pueden ser biológicos como enfermedades de las plantas o geoespaciales según el dominio agrícola. Los datos pueden estar en diversos formatos (Tesfaye et al 2016), como contenido multimedia (videos, imágenes, audio) (Sivarajah et al 2017) y contenido textual (estructurado, semiestructurado y no estructurado). Posterior a su captura, los datos que fueron recopilados se almacenan en una base de datos informática y se procesan mediante cálculos informáticos que permiten abordar el tema de interés, como características de las semillas, los patrones climáticos, las propiedades del suelo, la gestión comercial y de marketing, la gestión de inventario, entre otros (Su & Wang, 2021). Para gestionar el BD en la agricultura se emplea una variedad de técnicas y herramientas, como el aprendizaje automático, las plataformas basadas en la nube y el modelado y la simulación.

Existen diferentes experiencias de la aplicación de grandes datos en el sector agropecuario. Una de estas es la relacionada con el Consorcio de Centros Internacionales de Investigación Agrícola (CGIAR), quienes crearon una Plataforma para grandes datos en agricultura con el propósito de utilizar enfoques de grandes datos para impulsar las

soluciones para el desarrollo agrícola con mayor eficiencia, efectividad y escala que antes (CIAT & IFPRI, 2017). Es importante aclarar que la mayoría de los sistemas basados en grandes datos aún se encuentran en la etapa prototipado por lo que se requiere de mayor inversión e investigación (Kamilaris et al 2017; Su & Wang, 2021).

En la actualidad, las principales aplicaciones de grandes datos en la agricultura están enfocadas a:

- ✓ Pronósticos de rendimiento/plagas/enfermedades/clima.
- ✓ Selección de híbridos adecuados.
- ✓ Decisiones óptimas de cultivo.
- ✓ Recomendaciones sobre el monitoreo de la salud de los cultivos en sistemas al aire libre y bajo estructura.
- ✓ Diseño de granjas verticales en invernaderos.
- ✓ Análisis de precio de mercado y rentabilidad.
- ✓ Modelos científicos para asistir a los formuladores de políticas en la toma de decisiones a favor de la sostenibilidad del ecosistema físico.
- ✓ Operación/equipo/gestión de riesgos.

Informes sobre análisis de mercado de la tecnología de grandes datos en la agricultura han reportado que el tamaño de su mercado global en el sector se valoró en USD 817,57 millones en 2021 y se espera que continúe creciendo en una tasa compuesta anual del 7,65 % hasta el 2027, alcanzando los USD 1272,71 millones (Industry Research, 2022). En América del Norte, especialmente los Estados Unidos, seguirá desempeñando un papel importante al punto que cualquier cambio en materia de innovación que se efectúe, podría afectar la tendencia de desarrollo (Ryan, 2020). Europa también cuenta con actores importantes en el mercado, con un notable desempeño de Alemania, Reino Unido, Francia, Italia, Rusia y Turquía. Respecto a Asia y el Pacífico, se han destacado China, Japón, Corea, India, Australia, Indonesia, Tailandia, Filipinas, Malasia y Vietnam. En Oriente medio y África, han figurado Arabia Saudita, Egipto, Nigeria y Sudáfrica. Algunas de las empresas clave para la expansión de grandes datos en el sector agropecuario global han sido The Climate, Awhere, Farmlogs, Onfarm, Farmersedge, Agribotix, Agdna, y Conservis (Industry Research, 2022).

Un caso particular frente a la implementación de los grandes datos es el de China, uno de los países que más acciones gubernamentales han llevado a cabo al respecto. Desde el 2015, el Consejo de Estado ha promulgado varios documentos importantes que fortalecen el desarrollo, servicio y supervisión de los grandes datos en el mercado (Network of the Central People's Government of the People's Republic of China, 2015). El Ministerio de Agricultura chino también ha presentado documentos y planes quinquenales desde el 2016, donde han aumentado la inversión, han acelerado el intercambio, han promovido la transformación industrial y le han dado enfoque especial a la gobernanza social agrícola (Network of the Central People's Government of the People's Republic of China, 2016). Por otro lado, el Centro Nacional de Big Data Agrícola, liderado por el Ministerio de Agricultura de China, ejecutó una inversión de 30 millones de yuanes para el fortalecimiento de sus procesos. A partir del interés gubernamental han surgido grandes centros de datos agrícolas en todo el país; ejemplo de ello es el China Agricultural Big Data, construido por Breck Agricultural Information Technology Co., Ltd., el cual tiene como alcance de investigación la fusión, recopilación y visualización de datos agrícolas, como también la toma de decisiones inteligente de planificación industrial y precisión agrícola. Además, brindan créditos agrícolas y cubren la gestión de riesgos (Jie et al 2019).

Otro ejemplo de grandes datos en el país asiático fue la construcción de una plataforma integrada con los servicios en la nube para la gestión del marketing ganadero. Esta plataforma combinó el comercio electrónico con el modelo de negocio tradicional, y permite analizar de manera inteligente la información de oferta y demanda de productos ganaderos, al tiempo que permite realizar ventas en línea de productos ganaderos junto con supermercados por medio del aplicativo (Huang et al., 2015).

Aunque diversos países han trabajado en fortalecer los grandes datos para la gestión de la información y conocimiento al interior de sus fronteras, existen grandes limitaciones frente al acceso a la información que puedan tener otros países con sistemas productivos similares, enfermedades asociadas a la producción agropecuaria, entre otras cuestiones de interés del sector. Falta de coordinación de emergencias en las relaciones y políticas internacionales, ausencia de modelos e intereses en común para promover los grandes

datos, y los peligros ocultos de la seguridad de los datos se han presentado (Jie et al 2019). En ese sentido, es esencial fortalecer el campo de la cooperación internacional para que incentive una masificación de la implementación de los grandes datos para la toma de decisiones que favorezcan a pequeños y medianos productores agropecuarios.

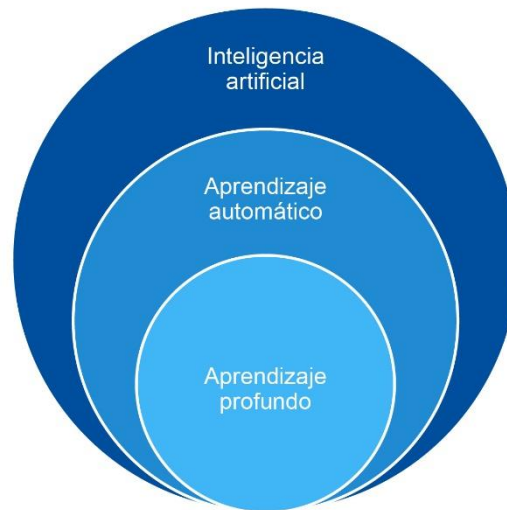
## Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) es un campo que combina la ciencia informática y grandes conjuntos de datos a través de una serie de estructuras informáticas y cálculos matemáticos con el propósito de emular la inteligencia humana, como la percepción sensorial y la toma de decisiones (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). La raíz de su implementación en la agricultura se encuentra asociada con la Agricultura 4.0, pero su campo de acción se está ampliando en la Agricultura 5.0, siendo promotora de la digitalización de la agricultura. La contribución principal de la IA en la agricultura radica en su flexibilidad, alto rendimiento, precisión y rentabilidad (Eli-Chukwu, 2019).

Los sistemas de IA pueden diferenciarse en distintos tipos y subcategorías (Castillo-Díaz, 2022). Respecto a los tipos, se encuentra la IA débil o estrecha (ANI, Artificial Narrow Intelligence). Su funcionalidad apunta a llevar a cabo tareas concretas y se encuentra presente en la mayoría de las herramientas inteligentes usadas actualmente, como, por ejemplo, los asistentes virtuales Siri (APPLE) o Alexa (AMAZON). Por otro lado, se encuentra la IA fuerte que aún se encuentra en un estado de carácter teórico-experimental y que se compone a su vez entre IA fuerte general (AGI, Artificial General Intelligence) e IA fuerte superior (ASI, Artificial Super Intelligence). La AGI busca simular el intelecto y raciocinio humano, mientras que la ASI sobrepasaría el intelecto humano y podría llegar a ser el puente a la siguiente revolución industrial (Castillo-Díaz, 2022).

En el campo de la IA existen otros dos componentes o subcategorías: el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo. Es importante resaltar que el aprendizaje profundo hace parte del aprendizaje automático; sin embargo, cada uno tiene su propio grupo de cálculos o algoritmos que permiten desarrollar modelos expertos, para efectuar

proyecciones o clasificaciones (Castillo-Díaz, 2022). En la Figura 5 se observa de manera simplificada la dimensión de cada uno.



**Figura 5.** Subcategorías de la IA.

Fuente: Castillo-Díaz (2022).

En el sector agropecuario, la IA aún está en la línea de salida; no obstante, se continúa observando su potencial y nuevos desarrollos. Ejemplo de ello y en relación con el análisis de fuentes de datos de gestión del suelo, como la temperatura, el clima, la humedad y el rendimiento histórico de los cultivos, los sistemas de IA están proporcionando información predictiva sobre qué cultivo plantar en un año determinado y cuándo son las fechas óptimas para sembrar y cosechar en un área específica (Fu et al 2020). De igual manera, el fenotipado de alto rendimiento en cultivos, la detección de frutos y las estimaciones de biomasa son avances que empiezan a tomar predominancia (Näsi et al 2018; Fu et al 2020; Apolo-Apolo et al 2020; Jung et al 2021).

La IA también está estableciendo el camino para mejorar los procesos de detección e identificación de enfermedades o respuestas negativas a estreses abióticos de las plantas mediante algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo (Martos et al 2021). Varios estudios sobre segmentación y detección de objetos, subconjuntos de aprendizaje profundo, incluyen estudios sobre enfermedades del pepino, de cultivos frutales, de tomate, de maíz y de la fresa (Khan et al 2018; Stewart et al 2019). El progreso de la IA en la agricultura se verá facilitado por otros avances tecnológicos, incluidos el análisis de grandes datos, la robótica, el internet de las cosas, la disponibilidad de sensores y cámaras,



la tecnología de drones e incluso la cobertura de internet a gran escala en campos geográficamente dispersos (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

La financiación de IA ha aumentado en 450 % en los últimos 5 años (Murugesan et al 2019). Diferentes países del mundo avanzan en el desarrollo e implementación de IA para diferentes sectores de la economía. En India, el Ministerio de Comercio e Industria ha conformado un grupo de trabajo de IA para aprovechar la tecnología en beneficio económico y ofrecer recomendaciones de política sobre su despliegue e implementación a través de cinco áreas de enfoque: educación, agricultura, movilidad inteligente, ciudades inteligentes y cuidado de salud (Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones, 2022).

Otro ejemplo del uso de IA está relacionado con la plataforma norteamericana *Agroview* (<https://www.agroview.ai/>). Esta plataforma permite simplificar el proceso de topografía, facilitando la recolección de datos y por ende el costo. El proceso está mediado por sensores que toman los datos en el terreno para su posterior análisis (Ampatzidis et al., 2020). Algunos de los softwares basados en IA ofrecidos en el mercado para el sector agrícola se encuentran en la Tabla 3.

Las ventas también son un escenario fundamental en el sector agropecuario; es así como se viene manifestando el interés en desarrollar aplicaciones web y móviles que permitan gestionar las ventas de los productos y servicios generados en el sector haciendo uso de IA y computación en la nube (Abuchaibe & Gómez, 2021). No obstante, no existe en el mercado un gran número de opciones de software o aplicaciones de acceso gratuito o de bajo costo enfocadas en la agricultura; algunas de estas se describen a continuación:

**Tabla 3.** Softwares basados en IA ofrecidos en el mercado para el sector agrícola

Aplicativo	Descripción
Tambero	Software de gestión agrícola basado en la web que facilita la gestión eficiente de cultivos. También permite el pronóstico del tiempo y su uso puede realizarse con manejos agrícolas y de ganadería. Puede utilizarse en diferentes tipos de dispositivos (Tambero, 2022).

FarmOS	Software de gestión agrícola basado en web que provee infraestructuras para la planificación y mantenimiento de registros agrícolas. El aplicativo permite el registro de datos sin conexión y permite ser usada en diferentes dispositivos (FarmOs, 2022).
Trimble	Software de gestión basado en la web que cuenta con un plan gratuito para agricultores que les permite el acceso a datos de pronósticos, clientes, gestión y registros de rendimiento, desde cualquier ubicación del mundo mediante conexión a la web (Trimble, 2021).
FarmAtHand	Es un software multiusuario que funciona en dispositivos móviles y que permite la gestión de ventas, equipos e inventarios relacionados con el sector agropecuario (FarmAtHand, 2021).
Tania	Software de gestión de granjas de código abierto basado en lenguaje de programación Go, Vue.JS y SQ Lite. Cuenta con licencia de Apache 2.0, lo que permite asociar y gestionar sensores (Tania, 2021).
FarmRexx	Software de gestión agrícola que realiza el seguimiento de equipos, registros, movimientos, productos, y registros meteorológicos (FarmRexx, 2021).

---

Fuente: Tapias (2021).

A pesar de que a nivel mundial se está invirtiendo fuertemente en la implementación, investigación e innovación en torno a las tecnologías 4.0 y 5.0, y en particular en IA, existe una creciente preocupación frente a la automatización de muchos trabajos y el impacto en la cifra de desempleo en los diferentes sectores de la economía. En tal sentido, en 2019, el Fondo Monetario Internacional – FMI estableció que en dos décadas aproximadamente el 11% de empleos ocupados por mujeres y el 9% por hombres podrían desaparecer debido a la automatización por la irrupción de la IA.

## Aprendizaje automático

El aprendizaje automático, machine learning en inglés, es la capacidad de enseñar a las máquinas a aprender a partir de los datos sin ayuda explícita de los humanos. El aprendizaje automático utiliza cálculos o algoritmos diseñados para ingerir grandes cantidades de conjuntos de datos y aprender con el tiempo a través de parámetros establecidos y sistemas de recompensa, promoviendo una mejora continua en tareas

específicas. Las habilidades del aprendizaje automático se pueden estructurar en ingeniería de software (algoritmos y estructuras de datos), matemáticas (probabilidad y estadística), procesamiento del lenguaje natural y ciencia de los datos (algoritmos de modelización y comprobación de hipótesis). Los principales lenguajes de programación para aprendizaje automático son Python, SQL, Java, y R, mientras que algunos de los principales programas son TensorFlow Apache Spark o Hadoop, MATLAB, PyTorch y Google Cloud ML Engine (Equipo de edX, 2021).

Una revisión de investigación realizada por Sharma et al. (2020) muestra las diversas aplicaciones del aprendizaje automático en los sistemas productivos agropecuarios. La revisión hace énfasis en aplicaciones que buscan la sostenibilidad de los sistemas productivos y presenta diferentes opciones para su implementación en los diferentes niveles de la cadena de suministro agrícola. En particular, se destaca la aplicación del aprendizaje automático para realizar predicciones en procesos de producción para la gestión de demanda, calidad y productividad, como también en procesos de transporte y distribución que implican a varias partes interesadas para poderlas coordinar efectivamente. La gestión de la calidad de los alimentos, la producción de residuos, la generación de huellas ambientales y el análisis de consumidores también pueden ser analizados mediante el aprendizaje automático para tomar decisiones de mejora continua a través del tiempo.

## Aprendizaje profundo

El aprendizaje profundo, Deep Learning en inglés, es una técnica que se usa para llevar a cabo el aprendizaje automático y consiste en el uso de redes neurales profundas para aprender y tomar decisiones con datos complejos (Schmidhuber, 2015). La principal ventaja del aprendizaje profundo es el aprendizaje de características, que implica la extracción automática de características, es decir, de grandes conjuntos de datos informativos de alto nivel (Kakani et al 2020).

La mayoría de los modelos de aprendizaje profundo se entrenan con imágenes y datos de sensores recopilados de los campos. Esto indica que el aprendizaje profundo se puede aplicar a una amplia variedad de conjuntos de datos. El aprendizaje profundo se utiliza en el sector agrícola principalmente para resolver problemas asociados con las aplicaciones de visión por computadora que apuntan a la predicción de parámetros clave, como el rendimiento de los cultivos, el contenido de humedad del suelo, las condiciones climáticas y las condiciones de crecimiento de los cultivos; además de la detección de enfermedades, plagas y malezas y la identificación de especies de hojas o plantas (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Aunque el aprendizaje profundo tiene el potencial de habilitar la agricultura digital, la mayoría de los sistemas aún se encuentran en la fase de prototipo (Abbasi et al 2022).

## Internet de las cosas

El concepto de Internet de las cosas, Internet of Things (IoT) como se conoce en inglés, se refiere a un universo de dispositivos informáticos, sensores y máquinas interrelacionados y conectados a Internet, donde cada dispositivo tiene identidad y capacidades únicas para llevar a cabo la detección y el monitoreo remoto (Aqeel-ur-Rehman et al 2010). El IoT impulsa la Agricultura 4.0 y es una de las razones por las que la agricultura puede generar una cantidad tan grande de información valiosa (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

La mayoría de los desarrollos en IoT se encuentran en una etapa conceptual o en forma de prototipo (no comercial). No obstante, la atención se ha centrado en siete aplicaciones: gestión inteligente del agua, monitoreo inteligente, dosificación agroquímica, manejo de enfermedad, cosecha inteligente, gestión de la cadena de suministro y prácticas agrícolas inteligentes (Friha et al, 2021). Algunos estudios han abordado la implementación de IoT en los sistemas agrícolas modernos, como la agricultura vertical (acuaponía, hidroponía y aeroponía) y la agricultura en estructuras de invernadero (Abbasi et al 2022). Se proyecta que el uso del IoT puede aumentar la productividad agrícola hasta un 70 % para 2050 (Mariani & Kaji, 2016). Estudios de OnFarm encontraron que para una granja promedio que usa IoT, el rendimiento aumenta en un 1,75% y los costos de energía se reducen de 17 a

32 dólares por hectárea, mientras que el uso de agua para riego se reduce en un 8 % (Gralla, 2018).

Tzounis et al. (2017) encontraron que IoT puede optimizar la producción al mover tierras de cultivo e invernaderos de un modelo de producción agrícola de precisión a uno de microprecisión, lo que permite condiciones de crecimiento vegetal óptimas para los recursos agrícolas. Shi et al. (2019) evidenciaron que el IoT tiene un impacto significativo en tres campos principales de la agricultura protegida que son: gestión de plantas, cría de animales y trazabilidad de la cadena de suministro agroalimentaria. Villa-Henriksen et al. (2020) reportaron que el IoT facilita el seguimiento de los recursos agrícolas (suelo, agua, cultivos), la documentación, la trazabilidad, la previsión y el control. Aún quedan varios desafíos por delante, incluida la confiabilidad, la capacidad de expansión, la universalidad, el nivel de resistencia e inteligencia, los problemas operativos y el costo (Rejeb et al 2022).

Las tendencias y acciones globales de IoT reportan que Estados Unidos y China encabezaron globalmente la inversión de IoT durante el año 2019 con 194.000 millones de dólares y 182.000 millones de dólares, respectivamente. Japón los siguió con 65.400 millones de dólares y Alemania con 35.500 millones de dólares. Las inversiones de Corea del Sur (25.700 millones de dólares), Francia (25.600 millones de dólares) y el Reino Unido (25.500 millones de dólares) también han sido destacadas. En relación con América Latina, los países que proyectan registrar el mayor crecimiento de inversión en IoT son México, Colombia y Chile (IoT, Signals, Ene.2019).

En Estados Unidos, específicamente en el estado de California, se sancionó en 2018 una ley de ciberseguridad estatal y desde este mismo año se ha aumentado sustancialmente la financiación de IoT. El país del norte del continente americano ha informado que entre 10% al 15% de los agricultores de Estados Unidos están utilizando soluciones de IoT en las granjas en aproximadamente 1200 millones de hectáreas y 250,000 granjas. Asimismo, empresas como Monsanto, DuPont, John Deere y otras están realizando inversiones para el aprovechamiento de los datos y herramientas tecnológicas para el campo (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

Los aportes de China frente a la implementación de IoT en la agricultura se ha evidenciado desde el gobierno. Sus políticas prevén incentivos fiscales preferentes para los fabricantes de IoT, y un fondo especial exige que las entidades públicas cuenten con una iniciativa de IoT (Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones, 2022).

En India, el Departamento de Electrónica y Tecnología de la Información (DEITY) presentó el primer proyecto de documento de política de IoT del país en 2016. Este documento define las bases de un marco de gobernanza sólido para la implementación holística de las políticas y campañas relacionadas con IoT. Además, el documento desempeñará un papel esencial en la realización de la visión del Gobierno de la India de un mercado de IoT de 15.000 millones de dólares, y permitirá a la India poseer casi el 5-6% de la industria mundial de IoT (IoT policy document, Meity; 2016).

En Filipinas, investigadores desarrollaron un sistema de cultivo aeropónico vertical que integra tecnologías IoT para monitorear factores como temperatura, humedad relativa, luz y concentración de nutrientes en el agua (Belista, y otros, 2018). En Indonesia, investigadores de la universidad de Telkom desarrollaron un proyecto para la optimización en la función de control de luces en cultivos aeropónicos basado en IoT, haciendo uso de la integración de sensores y Random Forest (Karuniawati, Putrada, & Rakhmatsyah, 2018).

La Unión Europea (UE), mediante diversos proyectos como “VIRTUOUS”, “NEWBIE”, “SWAMP”, están orientando a fortalecer la agricultura de precisión moderna con tecnologías computacionales de última generación en sistemas de IoT. También están en marcha la creación de nuevos software y aplicaciones habilitadas que pueden comunicarse verbalmente con los usuarios y recibir comandos, como, por ejemplo, AgroHub (Martos et al 2022).

En el continente africano, algunos países encabezados por organizaciones no gubernamentales están realizando grandes esfuerzos para la implementación de la IoT. Estas acciones buscan cruzar información del clima y la inspección de fotografías satelitales, con el fin de indicar a las personas que utilizan animales de pastoreo, el lugar más adecuado para que sus animales se alimenten bien; de igual manera buscan alertar

posibles sequias para que los productores tomen decisiones preventivas (Orjuela Santamaria & Economista, 2021).

Frente a la aplicación de la IoT en Latinoamérica, un estudio del Banco Interamericano de Desarrollo realizado en 2021 concluyó que la aplicación de esta tecnología junto con otras generó incrementos en la producción entre el 50% y 80% y reducciones de costos entre el 20% a 40%; sin embargo, y a pesar de los resultados la inclusión de esta tecnología, esta se masificó poco (CEPAL, FAO & IICA, 2021; Tapias, 2021). Investigadores de la Asociación Interciencia en Venezuela, llevaron a cabo la evaluación de un invernadero ubicado en el desierto de Atacama en Chile, haciendo uso de una arquitectura de monitoreo compuesta de dispositivos inalámbricos; esto con el propósito de optimizar la eficiencia en el uso del agua. Los datos generados se enviaron a un servidor mediante protocolos de IoT (protocolo MQTT) y fueron procesados por protocolos de IoT Cloud. Dicho proceso permitiría contar con información en tiempo real y generar recomendaciones al agricultor para la gestión de su invernadero (Villarroel, Goykovic, Caiconte, & Barraza, 2019).

## Computación en la nube y computación perimetral

La computación en la nube, cloud computing en inglés, se define como un modelo para habilitar el acceso a través de la red a un conjunto compartido de recursos o aplicaciones informáticas configurables (redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que se pueden aprovisionar y liberar rápidamente con un mínimo esfuerzo de gestión o interacción con el proveedor de servicios (Abbasi et al 2022). La arquitectura principal de la computación en la nube se compone de cuatro elementos: centro de datos (hardware), infraestructura, plataforma y aplicación. Cada uno de estos elementos está vinculado con modelos de servicios de nube específicos, que se clasifican como: i) software como servicio, ii) plataforma como servicio e iii) infraestructura como servicio.

La computación en la nube ha ganado gran atención durante la última década en la Agricultura 4.0 porque proporciona en primer lugar servicios de almacenamiento económicos para datos recopilados de diferentes dominios a través de red de sensores

inalámbricos y otros dispositivos IoT preconfigurados; en segundo lugar porque proporciona sistemas informáticos a gran escala para realizar una toma de decisiones inteligente al transformar estos datos sin procesar en conocimiento útil; y en tercer lugar porque promueve una plataforma segura para desarrollar aplicaciones agrícolas de IoT (Shi et al 2019).

La tecnología de computación en la nube también se usa para crear sistemas operativos de gestión agrícola que ayudan a los agricultores y administradores de granjas en el monitoreo eficiente de las operaciones agrícolas. Esta tecnología también tiene el potencial de contribuir a los problemas de la creciente demanda de alimentos, la contaminación ambiental causada por el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes y la seguridad de los productos agrícolas. Sin embargo, no tienen la capacidad de admitir la personalización del tiempo de ejecución en relación con los distintos requisitos de los agricultores (Fountas et al 2015).

Por otro lado, la aparición del concepto de computación perimetral, edge computing en inglés, puede resolver problemas asociados con la computación en la nube. La computación perimetral es un nuevo modelo informático que despliega recursos informáticos y de almacenamiento (como nubes o nodos de niebla) en el borde de la red más cercana de fuentes de datos como dispositivos móviles o sensores. En otras palabras, la computación perimetral ejecuta menos procesos en la nube y mueve esos procesos a lugares locales, como en la computadora de un usuario, un dispositivo IoT o un servidor perimetral. La computación perimetral minimiza la cantidad de comunicación a larga distancia que tiene que ocurrir entre un cliente y un servidor, y, por consiguiente, la computación perimetral gana sin lugar a duda en términos de velocidad y eficiencia en comparación con la computación en la nube. De esta manera, la computación perimetral facilita el análisis en tiempo real mientras mantiene los datos seguros en el dispositivo (Abbasi et al 2022).



## Cadena de bloques

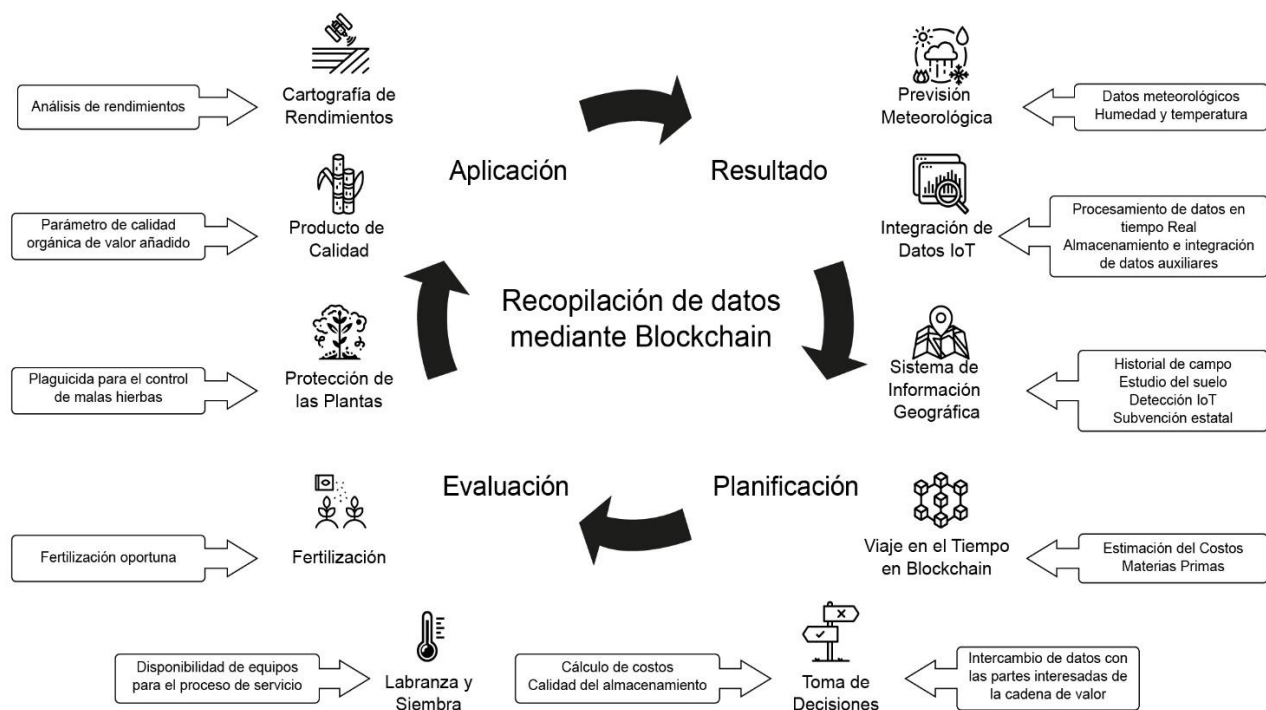
La cadena de bloques, en inglés Blockchain, es un gran libro compartido que puede ser comparado como un libro de contabilidad que permite identificar el histórico de acciones llevadas a cabo dentro de su red de servicios (Dey & Shekhawat, 2021). Los usuarios pueden agregar información o actualizarla en función de un producto en particular y de forma permanente. Estos registros de información se conocen como bloques. Los bloques son a prueba de hackers y son bastante seguros. La información relacionada con cualquier producto se puede guardar a través de internet y cualquier cambio en un bloque debe ser aprobado por el número máximo de partes interesadas quedando registro de dicho cambio (Walter et al 2017).

Blockchain es una TIC transformadora que tiene el potencial de revolucionar la forma en que se utilizan los datos para la agricultura. Ya sea que se aplique para administrar almacenes, silos y cadenas de suministro de manera más inteligente o se utilice en el campo como una herramienta para transmitir datos en tiempo real sobre cultivos y ganado (Saurabh & Dey, 2021). Hay pocos aspectos de una operación agrícola que no se beneficiarían de esta tecnología.

El creciente interés de la tecnología Blockchain en la agricultura exige una visión general clara y sistemática (Walter et al 2017). El 60% de los artículos publicados se centran en la cadena de suministro de alimentos y es que esa área es clave para la implementación del Blockchain ya que le permitiría al consumidor final hacer la trazabilidad del alimento que consume en términos de quien lo cultiva, en qué condiciones se cultiva, entre otras. Su innovación en la agricultura está muy dominada por la comunidad de investigación asiática, especialmente de China. Algunos estudios presentan la combinación de IoT y Blockchain para abordar los desafíos relacionados con la privacidad y la seguridad de IoT (Bermeo-Almeida et al 2018). Las contribuciones notables de Blockchain hacia la Agricultura 5.0 son ilustradas en la Figura 6 y son descritas a continuación:

- ✓ Los agricultores, consumidores y minoristas podrán registrarse y compartir información con la máxima seguridad, transparencia, y velocidad en orden cronológico (Bermeo-Almeida et al 2018).

- ✓ Los bloques serán visibles para todas las partes en la cadena de bloques, y cada parte tiene la libertad de aceptar o rechazar la información (Lin et al 2017).
- ✓ Los datos en tiempo real sobre la calidad de las semillas, la humedad del suelo, el clima y los datos relacionados con el medio ambiente, los pagos, la demanda y el precio de venta, entre otras cosas, estarán disponibles para los agricultores en una sola plataforma (Walter et al 2017).
- ✓ Un suministro efectivo de productos, precios justos, cadena de suministro de alimentos y seguimiento mejorado de productos. También facilitará a los agricultores la gestión en tiempo real del stock (Saurabh & Dey, 2021).
- ✓ La información directamente extraída desde la adquisición de semillas hasta la cosecha y la venta puede ser almacenada con esta tecnología. Esto ayudará a los productores y consumidores a cuantificar, monitorear y controlar los peligros durante la cadena agrícola (Bermeo-Almeida et al 2018).
- ✓ Los usos destacados de Blockchain también ayudan a los agricultores en la seguridad de cultivos, transacciones, y marketing (Saurabh & Dey, 2021).



**Figura 6.** Aplicación de diversas tecnologías de la información y la comunicación en la cadena de bloques en el flujo de datos e información sobre la agricultura.

Fuente: Dey & Shekhawat (2021).

El tamaño del mercado global del Blockchain en la agricultura se valoró en USD 123 millones en 2021 y se proyecta un crecimiento anual de 20.81% hasta el 2027, llegando a USD 383 millones. La lista de empresas pioneras en Blockchain del sector son Arc-net, BlockGrain, AgriDigital, Ambrosus tech, ChainVine y VeChain (Industry Research, 2022).

La FAO y el PNUD están probando la tecnología Blockchain en el marco del programa de apoyo para incrementar la mitigación del clima en el uso de la tierra y la agricultura. Este programa se denomina SCALA y cuenta con financiación de la Iniciativa Climática Internacional de Alemania (IKI). La metodología se está aplicando mediante la digitalización de la cadena de valor para la agricultura y los sistemas alimentarios, como también mediante el seguimiento de la sostenibilidad a través de elementos de datos clave. La meta inicial es guiar a legisladores, productores de alimentos y agencias de auditoría a estimular la adopción de prácticas resilientes al clima registradas en Blockchain. Otra meta de este programa es generar compromiso con el sector privado no solo para aumentar las inversiones sino también para incorporar políticas y tecnologías innovadoras (FAO, 2021).

España cuenta con varias empresas referentes en la tecnología Blockchain. Hispatec es una de ellas y desde 1985 desarrolla software y soluciones tecnológicas para incentivar el SmartAgro. Hispatec cuenta con más de 400 clientes entre México, Chile, Perú y Marruecos. Chainwood es otra empresa enfocada a la silvicultura. La implementación de Blockchain en la industria de la madera ha generado beneficios en trazabilidad y eficiencia. Foodchain y Mercatrece son otros ejemplos de éxito (Red de Especialistas en la Agricultura, 2020).

En América Latina, se ha identificado a partir de diversos estudios que el nivel de eficiencia de los procesos logísticos en el sector agropecuario es deficiente con alto costo de las transacciones. En ese sentido y como lo indica el BID (2020), la implementación del Blockchain reduciría sustancialmente estos costos y optimizaría las operaciones comerciales del sector. Promover el uso de la tecnología Blockchain incrementaría la

eficiencia y la productividad en los procesos logísticos, los costos aduaneros y los pagos transfronterizos (Rios Ato & Vera Zapata, 2021).

Progreso notable de la tecnología Blockchain se ha evidenciado en México con varias acciones. El gobierno de Tamaulipas impulsa un proyecto agrícola con la empresa GrainChain que busca monitorear los granos de maíz, sorgo y soja. El BID ha financiado con más de medio millón de dólares la plataforma mexicana EthicHub que tiene como finalidad facilitar préstamos para agricultores con tecnología Blockchain en el estado de Chiapas. La empresa local Luxelare se ha destacado por diseñar programas acordes a los requerimientos de los agricultores y los cultivos que funciona con sobrevuelos de drones y dispositivos IoT para recopilar y gestionar grandes datos protegidos con tecnología Blockchain (Red de Especialistas en la Agricultura, 2020).

En Brasil, específicamente en los estados de Río Grande y Bahía, se está expandiendo la solución online de licitación, la cual contribuye a los agricultores a obtener acceso a proveedores de todo el país y a almacenar los procesos y datos necesarios para las transacciones. La trazabilidad de la caña de azúcar en el país se está beneficiando por la tecnología Blockchain implementada entre la Corporación Brasileña de Investigación Agrícola (EMBRAPA) y la Cooperativa de Plantación de Caña de Azúcar de Sao Paulo (COPLACAN). Otra asociación aconteció entre Syngenta y Nucoffee para implementar Blockchain a las plantaciones de café (Red de Especialistas en la Agricultura, 2020).

## Realidad virtual y realidad aumentada

La realidad virtual es un entorno de escenas y objetos simulados con base a una apariencia real mediante tecnología informática (Lee et al 2021). Este entorno es contemplado por el usuario a través de dispositivos como gafas, casco de realidad virtual, guantes, trajes especiales, entre otros, que permiten una mayor interacción con el entorno, así como la percepción de diferentes estímulos que intensifican la sensación de realidad (Rovira-Más et al 2008). La realidad virtual ha representado tradicionalmente una herramienta para mejorar la experiencia del usuario en la interacción humano-computadora al realizar tareas

de visualización y manipulación (Jiao et al 2010). Aunque hay reportes sobre realidad virtual con un enfoque conceptual y de desarrollo de prototipos para la Agricultura 4.0, hay muy pocas publicaciones que describan la adopción de tecnologías (de Oliveira & Corrêa, 2020). La construcción de recursos de información multimedia sobre cultivos y ganado para la educación de animación tridimensional interactiva es el mayor uso de la realidad virtual (Li, 2007; Yu et al 2009). También se reporta usos en montaje y mantenimiento de máquinas agrícolas (Jiao et al 2010) y en la visualización de mapas tridimensionales (Rovira-Más et al 2008).

La realidad aumentada es aquella tecnología que permite agregar información, en tiempo real, a elementos virtuales del mundo real cuando ésta se visualiza a través de un dispositivo (de Oliveira & Corrêa, 2020). Las diferencias entre la realidad virtual y la realidad aumentada radican en el entorno y el soporte físico (hardware). A nivel de entorno, la realidad aumentada es una experiencia digital creada sobre el mundo físico y la realidad virtual es enteramente virtual. En términos de soporte físico, muchas aplicaciones de realidad aumentada requieren smartphones, tabletas y lentes transparentes que permiten superponer los contenidos digitales al entorno físico que nos rodea, mientras que la realidad virtual demanda el uso de lentes para proporcionar la experiencia virtual (Adobe, 2022).

El uso de sistemas de realidad aumentada ha abarcado la identificación de plagas, conducción de maquinaria agrícola, conducción de vehículos autónomos, montaje y mantenimiento de máquinas agrícolas, recolectando muestras de suelo con drones y coincidiendo con la realidad virtual en la visualización de mapas tridimensionales (Nigam et al 2011; Kaizu & Choi, 2012; Huuskonen & Oksanen, 2018; Sitompul & Wallmyr, 2019).

La realidad aumentada puede causar gran impacto en la agricultura, permitiendo apoyar los procesos demostrativos en torno al aprendizaje, el prototipado o incluso el sector comercial. Con la realidad aumentada se puede llevar a las personas o usuarios a observar patologías sobre los cultivos que en la vida real no están pero que en lo virtual están simuladas. De igual manera, simulaciones de un proceso productivo acelerado en el tiempo, conservando los matices del entorno, es viable de llevar a cabo.

## Metaverso

El metaverso no es una idea nueva porque ha circulado junto con el desarrollo de internet y otras tecnologías durante décadas. Su nombre es la combinación de meta y universo, y se define como un mundo 3D virtual compartido o incluso múltiples mundos multiplataforma que pueden brindar a los usuarios una experiencia de inmersión integral con actividades interactivas y colaborativas (Huynh-The et al 2023). Además de los lugares virtuales y las construcciones fijadas en el mundo virtual, muchas otras entidades, como objetos, identidades de usuarios y bienes digitales, pueden intercambiarse entre diferentes mundos virtuales e incluso reflejarse en el mundo real (Park & Kim, 2022).

Una plataforma estándar construida para un metaverso moderno debe garantizar las siguientes características:

- ✓ Infraestructura: 5G, 6G, wifi, nube, centro de datos, unidades centrales de procesamiento y GPU.
- ✓ Interfaz humana: móvil, reloj inteligente, gafas inteligentes, dispositivos portátiles, pantalla montada en la cabeza, gestos, voz y paquete de electrodos.
- ✓ Descentralización: agentes de IA, Blockchain y microservicios.
- ✓ Computación espacial: motores 3D, realidad virtual, realidad aumentada, mapeo geoespacial y multitarea.
- ✓ Economía del creador: herramientas de diseño, mercados de activos, comercio electrónico y flujo de trabajo.
- ✓ Descubrimiento: redes publicitarias, tiendas virtuales, curación social, calificaciones, avatar y chatbot.
- ✓ Experiencia: juegos, sociales, deportes electrónicos, compras, festivales, eventos, aprendizaje y trabajo.

El metaverso ha impulsado el desarrollo de hardware con base en infraestructura de almacenamiento de grandes datos, tecnologías de IA, redes de comunicación inalámbrica, sensores integrados y unidad de procesamiento gráfico, como también la optimización de

software que ha girado en torno a asignación de recursos en comunicaciones, procesamiento de lenguaje y visión por computadora (Huynh-The et al 2023).

Las contribuciones del metaverso a la agricultura están empezando a reportarse, por ende, el número de publicaciones es escaso. El enfoque que más ha llamado el interés es el desarrollar un marco ciber físico para servicios y aplicaciones de agricultura urbana inteligente con la principal meta de impulsar ciudades sostenibles inteligentes (Ghandar et al 2021).

## Nanotecnología

La nanotecnología es la manipulación de la materia a escala nanométrica entre 1 a 100 nanómetros. La nanotecnología es un campo muy amplio, que incluye diferentes disciplinas de la ciencia como la ciencia de superficies, química orgánica, biología molecular, física de los semiconductores, entre otras (Solanki et al 2015). Respecto a la agricultura, se han explorado diversas aplicaciones que emergieron desde la Revolución 4.0 (Figura 7). Las principales compañías proveedoras del mercado de la nanotecnología agrícola son Catalytic Materials, Chasm Technologies, Integran Technologies, NanoMaterials Technology, Nanophase Technologies, Quantum Sphere, Shenzhen Nanotech Port, Starpharma y Zyvex (Industry Research, 2022). En general, se están utilizando nanocápsulas y nanodispositivos para detectar y tratar las enfermedades de las plantas, para dirigir componentes activos deseados a sitios específicos, para la mejora de la absorción de nutrientes, para promover la bioeconomía circular, para disminuir gases efecto invernadero y para el tratamiento de aguas residuales (Dhewa, 2015; Romero-Perdomo y González-Curbelo et al 2023; Salinas-Velandia et al 2022). Es necesario hacer énfasis en que varios países han diseñado estrategias y planes en bioeconomía circular, como China, Italia, España, Ecuador y Colombia (Carvajalino-Umaña et al 2022), donde la nanotecnología ha sido escasamente incluida.



**Figura 7.** Uso de la nanotecnología en diferentes etapas de la agricultura.

Fuente: Shukla et al (2019).

La nanotecnología está impulsando el desarrollo de nanopartículas basadas en metales, como hierro, oro, plata, cobre, zinc, óxido de titanio, nanotubos de carbono y fullereno como agentes de preparación de semillas para mejorar el crecimiento, la germinación y la tolerancia tanto a estreses abióticos como a patógenos en las plantas (Ibrahim, 2016).

Los nanofertilizantes son un material potente que minimiza los efectos adversos de los fertilizantes convencionales, mejora la eficiencia nutricional y reduce la dosis de aplicación de los fertilizantes (Naderi & Danesh-Shahraki, 2013). La tecnología de nanofertilizantes es una forma innovadora de sustituir el uso de métodos tradicionales de fertirrigación, al liberar nutrientes de manera controlada y gradual en el suelo, evitando así la contaminación del suelo y la eutrofización de los recursos hídricos (DeRosa et al 2010). Los nutrientes están recubiertos con una fina película protectora, pueden administrarse como nanopartículas o emulsiones, o pueden encapsularse en nanomateriales (Shukla et al



2019). El uso combinado de nanofertilizantes con inoculantes microbianos, que en la actualidad son promovidos por la bioeconomía, representa una alternativa viable y prometedora (Mahapatra et al 2022; Romero-Perdomo et al 2015; Sánchez López et al 2014).

Los nanopesticidas son uno de los nuevos conceptos que se utilizarán en la agricultura para abordar los problemas asociados con los plaguicidas tradicionales (Kah et al 2013). Estos cubren una amplia gama de productos y son encapsulados en una película delgada de polímero para mejorar la dispersión en medios acuosos y permitir la liberación controlada de compuestos activos. La nanoencapsulación ayuda en la liberación lenta y específica del sitio de productos químicos con pH específico para el control de plagas (Gogos et al 2012). Las nanoformulaciones de dichos plaguicidas suelen estar compuestas por muchos polímeros (orgánicos), tensioactivos y nanopartículas metálicas (inorgánicas). Estos desarrollos son derivados de investigaciones previas en productos biobasados que en la actualidad son ampliamente difundidos (Mendoza-Labrador et al 2021).

Varias empresas agroquímicas están sintetizando productos químicos a nanoescala y los están encapsulando en nanocápsulas de manera que se abren en presencia del calor, la luz solar y las condiciones alcalinas del estómago de un insecto (Kah et al 2013). En el caso de los agroquímicos, el pequeño tamaño de las emulsiones y nanopartículas aumenta la potencia (Fraser & Campbell, 2019). Otras empresas están sintetizando nanoemulsiones a base de agua o de aceite, y estas suspensiones contienen nanopartículas pesticidas o herbicidas. Las nanocápsulas permiten la penetración de herbicidas a través de cutículas y tejidos y permiten la liberación baja y constante de los ingredientes activos (Shukla et al 2019).

Estudios con nanopartículas han permitido descubrir propiedades que mantienen los productos alimenticios frescos y nutritivos durante un período prolongado (Sozer & Kokini, 2009). Se ha encontrado que la nanotecnología favorece el envasado y almacenamiento de leche, jugo y otros productos agrícolas en comparación a los métodos convencionales en términos de seguridad (Shukla et al 2019). Para prolongar la vida poscosecha de los alimentos, las propiedades de barrera térmica y de gases de los nanocompuestos se

pueden explotar y utilizar en el transporte y almacenamiento de alimentos (Manjunatha et al 2016).

## Panorama de tecnologías 4.0 y 5.0 en Colombia

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2015), Colombia aún tiene una incipiente productividad agrícola y pecuaria, situación que afecta y limita la competitividad del país frente a industrias agrícolas y pecuarias de otras naciones. Esto implica no solo que las exportaciones de nuestros productos se vean comprometidas en materia de calidad, inocuidad, costo y oportunidad, sino también que el mercado interno sea débil frente a la introducción de productos desde el exterior. De igual manera, la OCDE estableció que el país sufre un relativo estancamiento tecnológico que, sumado a deficiencias infraestructurales, inequidad en el acceso a la tierra y una débil cadena de suministros, deja en evidencia la falta de competitividad y productividad sectorial. Estas problemáticas son aún más preocupantes al saber que el 17 % del total de la fuerza laboral del país se dedica a la agricultura (Ojeda-Beltrán, 2022). Esto ha llevado a la necesidad de implementar tecnologías y estrategias para hacer un sector más productivo y competitivo.

En respuesta inicial a la necesidad de fortalecer el sector agropecuario colombiano, se conformó el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA) mediante la sanción de la ley 1876 de 2017, con la finalidad de incrementar la competitividad, productividad y sostenibilidad sectorial, a través de la investigación, desarrollo tecnológico, transferencia de tecnología, gestión del conocimiento, formación, capacitación y extensión. Es así como a partir de estos pilares se busca la incorporación de nuevas tecnologías y técnicas enfocadas al sector agropecuario que permitan fortalecer la productividad y garantizar la calidad de vida de pequeños y medianos productores agropecuarios (Ojeda-Beltrán, 2022).

Varias estrategias pueden ponerse en marcha para que el sector agropecuario en el país se consolide no sólo como un sector de la economía, sino como la fuente de alimentos bajo una producción más limpia, sostenible y de calidad para mitigar el hambre de la población. Una de las principales soluciones para este propósito es la implementación de las herramientas relacionadas con la Agricultura 4.0 y 5.0.

Para que se pueda materializar la adopción de estas herramientas, es necesario colocar a disposición la información sobre las tecnologías y cómo hacer uso de estas, dar a conocer los costos de implementación y lanzar estrategias, subsidios o apoyos financieros, principalmente en los sistemas productivos de pequeños y medianos productores. De igual manera, se requiere trazar la hoja de ruta para el diseño y puesta en marcha de políticas públicas relacionadas con la implementación de estas tecnologías en los campos de la propiedad intelectual, bioética, fortalecimiento de capacidades y gestión de conocimiento.

Todo lo anterior implica un gran desafío en el desarrollo tecnológico del sector agropecuario en Colombia, lo que significa moverse hacia una Agricultura Inteligente y de Precisión, que permita la integración de herramientas como la IA, la IoT, la Blockchain, el metaverso, entre otras. Dichas acciones agregan valor a toda la cadena productiva y por ende benefician a los actores involucrados (Ojeda-Beltrán, 2022). En la actualidad, el Gobierno Nacional ha venido invirtiendo en la apropiación de tecnologías basadas en IoT, IA e industria 4.0 para el campo (MINTIC, 2019; Tapias, 2021). Dicho valor ascendió a 550.000 millones de pesos durante el 2021, y según lo manifestado por el gobierno en su momento, el país dispondrá de 30 billones para los próximos 10 años en materia de ciencia, tecnología e innovación (Arenales, 2022). Según el BID, Colombia necesita una inversión aproximada de US 110.089 millones para cerrar en 10% la brecha móvil de conectividad, y de US 842.056 millones para cerrar en igual medida la brecha fija de conectividad.

Cabe aclarar que, si bien el gobierno y sector privado vienen avanzando y realizando inversiones en estas nuevas tecnologías, todavía queda un camino extenso por recorrer, ya que las estrategias de producción a lo largo y ancho del territorio nacional aún son precarias en diferentes sistemas de producción. No obstante, a continuación, se describen

algunos avances a manera de ejemplos que han permitido la implementación de diferentes herramientas tecnológicas de la Agricultura 4.0 y 5.0.

Investigadores de la Universidad Nacional de Colombia en conjunto con la empresa Aeropónicos de Colombia ejecutaron un proyecto que permitiera elaborar un sistema de energía eléctrica en un sistema aeropónico para la producción de alimentos en ausencia de pesticidas. El sistema integró un hardware para el control de los algoritmos inteligentes en el sistema de producción, algoritmos de optimización de procesos y fuentes alternativas de energía (Hoyos, Cándelo, & Chavarría, 2018; Tapias, 2021). La Universidad de Pamplona desarrolló una iniciativa que buscaba automatizar una granja de conejos en el municipio de Mutiscua (Norte de Santander). La automatización facilita la integración de dos procesos relevantes: el primero relacionado con la producción de lombricomposta; el segundo relacionado con el forraje verde hidropónico en el invernadero (Santos & Lizcano, 2020; Tapias, 2021).

En la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) se desarrolló un sistema para la gestión del riego para el cultivo de cilantro por aeroponía. Este sistema de riego permitía la auditoría y captura de los datos generados a través de la evaluación de variables como humedad relativa, temperatura, y pH, garantizando de esta manera un riego óptimo para el cultivo, y el uso eficiente del agua y los nutrientes (Tapias, 2021). En la Universidad Autónoma de Bucaramanga se desarrolló como proyecto de investigación una iniciativa que buscó implementar tecnologías IoT para monitorear variables ambientales que inciden en la producción hidropónica de cultivos de flores. Su desarrollo se articulaba con un servicio web donde el productor visualiza la información captada por los sensores (Briceño & Cubides, 2020; Tapias, 2021).

En la Universidad de Antioquia se desarrolló un sistema IoT fundamentado en el protocolo LoRa que permite gestionar cultivos verticales hidropónicos. El sistema monitorea en remoto diferentes variables como pH, humedad, conductividad eléctrica, temperatura, entre otras mediante el uso de la plataforma Sentilo. Esto permite al productor optimizar la toma de decisiones en relación con el suministro de nutrientes, control de riego, entre otros aspectos a partir de los datos registrados. Los estudiantes al final del trabajo recomiendan

fortalecer el sistema mediante la implementación del aprendizaje automático (Plazas, 2020; Tapias, 2021).

Otros desarrollos asociados con la empresa privada son por ejemplo la aplicación Waruwa, que es una plataforma diseñada para comunicar a campesinos y productores frutícolas y hortícolas con restaurantes. De igual manera esta plataforma permitió fortalecer logística de distribución de frutas y hortalizas a través de domicilios en Bogotá. Otra plataforma en crecimiento es Agrapp, la cual es un sitio de inversiones que conecta productores con inversionistas para llevar a cabo el desarrollo de proyectos productivos (Méndez Bocanegra, 2020). También se encuentran empresas internacionales que ofertan sus servicios en el país, como la empresa europea Eurotrading que tiene Colombia la serie NanoTech, los cuales son fertilizantes que facilitan de manera inteligente nutrientes al sistema productivo (Industry Research, 2022).

También se puede identificar AGROBIT, una plataforma digital que apoya integralmente al productor agropecuario. Esta plataforma transforma datos de origen económico, biológico y tecnológico en información de gran importancia para tomar decisiones que orienten la sostenibilidad y sustentabilidad del sistema productivo (<https://agrobit.com>). Por otro lado, se encuentra AGRI, el cual es un software de gestión especializado en el sector agrícola, que facilita al productor a controlar sus costos, planificar actividades, automatizar procesos agrícolas, gestionar maquinarias, equipos y obtener reportes automáticos de cualquier dispositivo (<https://www.agri.com.co/>). AgroTIC es otro desarrollo destacado que está siendo implementado en el municipio de Simacota del departamento de Santander por el grupo de investigación en diseño de algoritmos y procesamiento de datos multidimensionales de la Universidad Industrial de Santander y la Asociación de Productores Cítricos y Productores Agropecuarios de Simacota – ACITRISIM. El desarrollo es plasmado en una aplicación móvil que tiene la capacidad de estimar volúmenes de oferta de cítricos de la región necesarios para el proceso de comercialización, ofrecer asistencia técnica agrícola a través del chat campesino, promover el relacionamiento comercial y determinar los índices de vegetación obtenidos mediante imágenes adquiridas por la cámara de teléfonos inteligentes (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación,

2023). A continuación, se listan diversos avances que se han generado en el país (Tabla 4). No obstante, la lista sigue creciendo dado el auge del desarrollo de la IA.

**Tabla 4.** Aplicaciones de tecnologías 4.0 y 5.0 para el sector agropecuario en Colombia.

Aplicación	Descripción
Cafeon	Es una app móvil basada en aprendizaje profundo que clasifica los granos de café de acuerdo con su calidad.
Agribot	Es un asistente virtual, práctico y portátil para la producción agrícola que interactúa con los productores.
IJCropSeed	Es una herramienta de acceso libre, código abierto y simple de usar que realiza análisis de imágenes de semillas de varios cultivos agrícolas.
AgroDSS	Este sistema basado en la nube proporciona una caja de herramientas para apoyar la toma de decisiones del agricultor respecto de su sistema productivo.
Amase	Sistema de apoyo visual que permite diagnosticar y seleccionar cuales modelos de predicción funcionan mejor.
AgroTIC	Es una aplicación móvil enfocada en la producción y comercialización de cítricos.

Fuente: (Ojeda-Beltrán, 2022)

Es importante resaltar que adicional a las aplicaciones y desarrollos mencionados en apartados anteriores, en la plataforma de soporte al Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria – SNIA Portal Siembra, se lograron identificar diferentes tecnologías ofertables por diferentes instituciones, que se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Ofertas tecnológicas generadas por las instituciones del sector agropecuario.

Título	Tipo de Oferta	Organización Oferente
Geoportal en Caña de azúcar	Sistemas expertos	CENICAÑA
Guía de recomendaciones técnicas en Caña de azúcar	Sistemas expertos	CENICAÑA
Meteoportal – Clima para Caña de azúcar	Sistemas expertos	CENICAÑA
Geopalma Plantación en Palma	Software	CIAT
Aplicativo para dispositivos móviles que permite monitorear el proceso de beneficio del café	Software	CENICAFÉ
Dispositivo para control de calidad de la recolección de café	Software	CENICAFÉ

Tecnologías modernas para el Procesamiento de Yuca AlimenTro.	Sistemas expertos	CLAYUCA
Dr. agro. Un aliado para el campo colombiano.	Software	AGROSAVIA
Plataforma de información genómica en la raza Cebú Brahman, para uso en selección y mejoramiento genético.	Software	AGROSAVIA
Evaluación genómica para animales de la raza Blanco Orejinegro (BON).	Software	AGROSAVIA
Tecnología NIRS para el análisis rápido y confiable de la composición química de los forrajes tropicales.	Software	AGROSAVIA
Sistema de Información Geográfico para el Sistema Productivo de Caucho natural en Colombia V.1.0.	Sistemas expertos	AGROSAVIA
Sistema de Información Geográfico para especies forestales de interés comercial en Colombia V.1.0.	Sistemas expertos	AGROSAVIA
Servicio de información productiva y genómica de la raza criolla Costeño con Cuernos para uso en selección y mejoramiento genético.	Sistemas expertos	AGROSAVIA
Sistema de información de suelos para el altiplano cundiboyacense - IRAKA.	Software	AGROSAVIA
Formulador de dietas para animales del trópico -DieTro.	Software	AGROSAVIA
Sistema de apoyo a la toma de decisiones (SATD) en bienestar de bovinos lecheros.	Software	AGROSAVIA
Sistema experto para el diseño estándar de hornillas térmicamente eficientes.	Sistemas expertos	AGROSAVIA
PDRIET Para La Formulación De Programas De Desarrollo Rural Integral Con Enfoque Territorial	Sistemas expertos	Corporación Para el Desarrollo Sostenible y Participativo de los Pequeños Agricultores-PBA
Software CeniSiic para palma	Software	Duas Rodas S.A.S/Colflavor S.A.
Sistema de Administración Computarizado de Fincas Arroceras, SACFA Lite	Software	FEDEARROZ
Sistema Inteligente de Fertilización Arroceras, SIFA WEB	Software	FEDEARROZ

Determinación de metales pesados	Sistemas expertos	Instituto de Ciencia y Tecnología Alimentaria-Fundación INTAL
Determinación de plaguicidas en aguacate	Sistemas expertos	Instituto de Ciencia y Tecnología Alimentaria-Fundación INTAL
Tabla nutricional de alimentos	Sistemas expertos	Instituto de Ciencia y Tecnología Alimentaria-Fundación INTAL
Sistema de Información SIPRA dispuesto para el proceso de identificar y planificar las zonas con potencial de desarrollo rural, económico y social	Sistemas expertos	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria-UPRA
Prestación de servicios de análisis de suelos a los caficultores del Departamento del Quindío	Sistemas expertos	Universidad del Quindío-UNIQUINDIO
Biología computacional	Sistemas expertos	Universidad EAFIT-EAFIT
SimpleSpace	Sistemas expertos	Universidad EAFIT-EAFIT
Software para invernaderos	Software	Universidad EAFIT-EAFIT
Laboratorio de Poscosecha y Control de Calidad	Sistemas expertos	Universidad Nacional de Colombia-UNAL
Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos	Sistemas expertos	Universidad Tecnológica de Pereira-UTP

Fuente: Siembra 2023

AGROSAVIA también ha aportado al desarrollo de este tipo de tecnologías. Ejemplo de ello es el sistema de información de alimentos del trópico para alimentación animal (AlimenTro). Este es un sistema de información abierto soportado en grandes datos con datos sobre recursos alimenticios utilizados en alimentación animal en Colombia. El objetivo principal de este recurso es ofrecer información relacionada con la producción animal en Colombia, buscando contribuir al desarrollo de los sistemas de alimentación animal (Ariza et al 2020).

Además de AlimenTro, Agrosavia ha desarrollado el sistema de apoyo a la toma de decisión agroclimáticamente inteligente llamado M.A.P.A., una herramienta de las tecnologías de la información que contribuye a la toma de decisiones buscando que los sistemas de cultivo logren adaptarse de mejor manera al cambio y variabilidad climática de Colombia. También existen otras iniciativas como el Sistema de Información de Suelos



para el Altiplano Cundiboyacense – IRAKA, el Formulador de dietas para animales del trópico – DieTro, una aplicación geo informática para la visualización de información agropecuaria del distrito de riego de zulía (Colombia) – ViMaz, entre otras.

Adicional a las tecnologías mencionadas anteriormente, la aplicación de las tecnologías emergentes en la investigación de Agrosavia es cada vez mayor. Estudios se han conducido mediante el uso de métodos de aprendizaje automático para diagnosticar propiedades químicas en suelos cañeros colombianos. Esto ha permitido tomar decisiones con mayor rapidez por parte de los agricultores para lograr una nutrición óptima de las plantas y el suelo (Delgadillo-Duran et al., 2023). Estimaciones del estrés hídrico en plantas de papa mediante imágenes hiperespectrales y algoritmos de aprendizaje automático se han logrado con altos niveles de precisión, como también estimaciones de la producción primaria bruta de zanahoria (Castaño-Marín et al., 2023; Duarte-Carvajalino et al., 2021).

En relación específica con inteligencia artificial, AGROSAVIA viene desarrollando proyectos de investigación que generen desarrollos que aporten a las capacidades técnicas de diferentes cadenas entre las que se encuentra la ganadera y la apícola. Además de explorar alternativas para la gestión de información relacionada con el recurso genético vegetal (Tabla 6).

**Tabla 6.** Proyectos de Agrosavia relacionados con IA.

Nombre Completo del Proyecto	Investigador	Estado del Proyecto	Descripción
Soluciones biotecnológicas para mejorar el desempeño reproductivo de los bovinos en procesos in vivo e in vitro	Fabian Leonardo Rueda Alfonso	Finalizado	Desarrollo e implementación de tecnologías que apoyen los procesos relacionados con reproducción bovina, ajustadas y validadas para la realidad actual de la ganadería colombiana. Desarrollar herramientas para selección de reproductores (machos y hembras), detección del estro y detección temprana de la preñez, apoyadas en entornos de programación de aplicaciones móviles de fácil acceso y el análisis de imágenes térmicas y espectrales generadas desde vehículos aéreos no tripulados, comúnmente conocidos como drones.

Fortalecimiento de la Cadena de Valor de la Carne Bovina mediante la Optimización del Microbioma del rumen y el Manejo de Forrajes Utilizando una plataforma Digital	Lorena Angelica Aguayo Ulloa	En Ejecución	<p>Este es un proyecto de cooperación de la Asociación de investigación en Ciencia y tecnología para el desarrollo sostenible, SATREPS, financiado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, JICA, con el fin de obtener nuevos conocimientos para el beneficio del sector ganadero de Colombia.</p> <p>El objetivo principal del proyecto es establecer una base tecnológica para fortalecer la cadena de valor de la carne bovina en la región del clúster cárnico del Caribe, alimentada con forrajes y utilizando una plataforma digital. Esto será posible a través del uso de tecnologías como el estudio del microbioma ruminal de vacas madre elite cuyos terneros tienen más rápido crecimiento, utilizando la inteligencia artificial y modelamiento tanto para la predicción del crecimiento animal como para el manejo y predicción de la biomasa y calidad nutricional del forraje, utilizados para la alimentación animal.</p>
Clasificación de polen con Inteligencia Artificial. Generación de valor agregado en polen mediante la determinación de su origen botánico a través de métodos de aprendizaje supervisado.	Carlos Alberto Martinez Niño	Finalizado	<p>Proyecto busca evaluar diferentes tipos de métodos de aprendizaje supervisado y diferentes conjuntos de variables explicativas en términos de su eficiencia en la labor de clasificación del polen, como producto derivado, esto permitirá responder la pregunta de si un conjunto de variables de fácil y barata medición pueden servir para construir un clasificador con un desempeño aceptable; además permitirá realizar la clasificación de manera automática, lo cual será una herramienta útil para productores y asesores.</p>
Artificial intelligence as a tool for the analysis of the diversity of plant genetic resources in genebanks (Phaseolus case)	Juan Camilo Henao Rojas	En Ejecución	<p>Utilizar herramientas de inteligencia artificial para analizar exhaustivamente datos fenotípicos, genómicos y ambientales asociados a las accesiones de germoplasma de plantas conservadas en bancos de germoplasma para alcanzar una comprensión profunda de su diversidad genética.</p> <p>uso de IA para:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) identificar rasgos fenotípicos y agronómicos que sean altamente informativos para la clasificación y priorización de accesiones de germoplasma</li> <li>(2) identificar variantes genéticas relacionadas con rasgos agronómicos y variables ambientales de adaptación importancia en escenarios de cambio climático</li> <li>(3) generar un software gratuito y una interfaz gráfica para ayudar a los investigadores en el análisis y visualización de datos multidimensionales asociados a las accesiones de bancos de germoplasma.</li> </ol>

Elaboración propia. Fuente: Portal Siembra

## Normativa y Política

El marco normativo y político para la implementación de las diferentes tecnologías asociadas con la Agricultura 4.0 y 5.0 es un reto para el país, de hecho, es un reto para los gobiernos del mundo, ya que gran parte de estas tecnologías son muy recientes. Ejemplo de ello es la regulación financiera y fiscal en torno al uso de la blockchain, que como se mencionó en apartados anteriores, permitiría el desarrollo de aplicativos para reducir los

costos transaccionales. En ese sentido, se necesitan estrategias o medidas de regulación, ya que los movimientos en materia financiera se realizarían de forma descentralizada a modo Peer to Peer (P2P) o mediante Smart Contracts, lo que implica que no se necesitaría de un intermediario bancario.

Lo anterior genera diversas interrogantes como ¿de dónde provienen los fondos?, ¿cuánto dinero se mueve a través de dichas plataformas?, ¿cómo se realizaría el cobro de impuestos?, entre otros. El gobierno Nacional cada vez más esclarece el funcionamiento de estas herramientas y va ajustando las medidas regulatorias; por ejemplo, a través del proyecto de ley 139 (PL.139-2021C) se regularían los servicios exchange de criptomonedas ofrecidos a través de diversas plataformas que funcionan bajo la tecnología Blockchain.

Otro aspecto del marco normativo y político es la generación de políticas públicas que incentiven el uso de estas tecnologías; es así como, el pilar fundamental para la adopción de herramientas de la agricultura inteligente, además de la optimización de la producción, deberá ser la mitigación del hambre en el marco del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Para ello, Colombia en su Constitución Política de 1991, específicamente en el artículo 44, promulga el derecho a una alimentación equilibrada y nutritiva para los niños (Orjuela Santamaria & Economista, 2021). Dicho aspecto es clave en virtud de formular políticas que incentiven las herramientas tecnológicas en función de la mitigación del hambre entre otras problemáticas presentes en el campo, en materia social, económica, ambiental, técnica y tecnológica.

La formulación de políticas públicas para la masificación de la Agricultura 4.0 y 5.0 no es ajena al Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación Agroindustrial Colombiano (PECTIA), donde el Gobierno Nacional, a través del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), viene trabajando en la incorporación de tecnologías para la innovación que permitan al campo colombiano ser más competitivo y sostenible mejorando la calidad de vida de la población en general (MinAgricultura de Colombia, 2015; Tapias, 2021).

En la actualidad, el país cuenta con una guía de lineamientos para el uso de tecnologías emergentes que permite orientar a los actores del sector público en la adopción y uso de nuevas herramientas digitales para desarrollar servicios y habilitar acciones internas más eficientes, intuitivos y seguros, facilitando la toma de decisiones a partir de datos. Colombia también cuenta con una Política Nacional para la Transformación Digital e Inteligencia Artificial en el marco del CONPES 3975, donde la Presidencia de la República de Colombia establece el marco ético para la IA en el país. Cabe destacar que esta guía no es de obligatorio cumplimiento por parte de las entidades, sino que contiene recomendaciones para la aplicación de principios éticos a proyectos que hagan uso de IA (Gobierno de Colombia. 2021).

## Perspectivas del sector

Colombia está en un punto clave para buscar el desarrollo y fortalecimiento de la producción agrícola y pecuaria. Para ello, debe promover la implementación a diferentes escalas de la siembra de cultivos que sean monitoreados a través de un sistema de IA que permita suplir los requerimientos nutricionales de las plantas y que la información se envíe al teléfono celular mediante un email o mensaje de texto (Orjuela Santamaria & Economista, 2021). En relación con la producción pecuaria, el país debe incentivar la trazabilidad e inocuidad con la implementación de aplicativos con base en la Blockchain, lo que permitirá ser competitivo internacionalmente.

Los costos de implementación son cruciales para la implementación de tecnologías 4.0 y 5.0. Ante esto, el Centro para la Cuarta Revolución industrial (C4IR) llevó a cabo una prueba piloto en diferentes fincas del país con diferentes sistemas productivos, donde se estimó que 55 millones de pesos colombianos son los costos aproximados necesarios a invertir por finca para contar con las siguientes tecnologías: sensores del clima, sensores del suelo, servicio de asesoría sobre el uso de suelo y clima durante 6 meses, servicio de instalación de sensores, servicio de captura de imágenes (satelitales y por drones), recomendaciones de fertilización basadas en inteligencia artificial, acceso a un sistema de gestión de información y suscripción a sucursal digital para e-commerce. Dicho proyecto

concluyó que los costos de implementación son elevados para un pequeño y mediano productor; cabe aclarar que la implementación de las tecnologías tiene un efecto positivo en la disminución de los costos operativos de los sistemas productivos evaluados.

Ante esto, es necesario que el Gobierno incentive el proceso de investigación en cuanto a las tecnologías 4.0 y 5.0, promueva pruebas piloto para dimensionar aspectos y condiciones claves de adopción e inversión, y faciliten la capacitación y acceso de los pequeños productores a estas pruebas piloto. Estas acciones pueden incentivar la producción de cultivos especializados en las regiones que garanticen la seguridad alimentaria y desincentiven el conflicto armado por la ausencia del Estado (Orjuela Santamaria & Economista, 2021). Así mismo, es necesario que el Gobierno busque estrategias para que el costo de implementación para pequeños y medianos productores sea menor, que podría ser mediada a través del incentivo a las empresas privadas y la generación de plataformas de libre acceso.

En el sector ganadero, se debe incentivar el uso de la IA para el control de insumos alimenticios por animal en virtud de una mayor eficiencia en la producción lechera y de carne garantizando al mismo tiempo la calidad del producto final. Ejemplo de ello es el monitoreo sobre los forrajes con los que el ganado se alimenta. Adicionalmente, la implementación de la IA entre otras tecnologías permitiría analizar cómo disminuir las pérdidas de producto en estos sistemas productivos ya que, en casos de desnutrición, las carnes son alimentos proteicos que aportan aminoácidos esenciales (Orjuela Santamaria & Economista, 2021).

Los gobiernos cuyos territorios cuentan con problemas de hambruna y desnutrición deben contar con una plataforma que identifique los cultivos que se siembran en el país, desarrollando un ejercicio similar al implementado en países africanos, que permite identificar anticipadamente posibles cambios climáticos, que pueden predecir en que periodos de sequía o de lluvias que afectarían el mantenimiento de los cultivos. Esta plataforma también permitiría identificar en qué periodos se pueden presentar desabastecimiento de productos agrícolas y pecuarios en el mercado, facilitando la toma

de decisiones de manera anticipada ante la escase y el efecto en la inflación (Orjuela Santamaria & Economista, 2021).

## Barreras para la implementación

Existen diversas barreras que impiden que la apropiación y generación de las herramientas 4.0 y 5.0 sea factible en Colombia. En primer lugar, el acceso a internet en el campo es limitado; en este sentido, y a pesar de que las tecnologías de información y comunicaciones pueden cambiar el cómo se producen los alimentos, además de facilitar el acceso y permanencia en los mercados, el país necesita prepararse y crecer en sectores como la educación, la infraestructura de vías y redes de comunicación y en la gestión de conocimiento para lograr apropiar, desarrollar e innovar en el uso e implementación de estas tecnologías (Ojeda-Beltrán, 2022). De igual forma y bajo esta misma mirada, es necesario promover una integración generacional que permita al campesino de generaciones anteriores a las tecnologías 4.0 y 5.0 adoptar de manera más fluida dichas tecnologías y herramientas para el fortalecimiento de sus capacidades productivas.

Un segundo aspecto para tener en cuenta es la oportunidad de acceso a estas tecnologías. Este acceso está marcado por aspectos técnicos, de capacidades y financieros. En relación con el aspecto técnico, el país se debe preguntar si puede acceder fácilmente a los componentes que se requieren para el desarrollo de los sistemas inteligentes, que implica importarlos y cómo estimular su implementación. En relación con las capacidades, es clave contar con programas académicos relacionados con el sector agropecuario que promuevan la exploración de las herramientas tecnológicas 4.0 y 5.0. De esta manera, se fortalecen las competencias de los extensionistas, se promueve la implementación de nuevos desarrollos tecnológicos y se capacita a los productores en el uso de estos desarrollos. Por último, frente al aspecto financiero, se requiere de estímulos económicos para que los pequeños productores puedan acceder a estas tecnologías, además de buscar que las empresas que realicen desarrollos para el campo creen aplicaciones fáciles de usar, gratuitas o de bajo costo.

Es claro que estas tecnologías permiten cerrar la brecha del desarrollo agropecuario en las diferentes regiones del país. Sin embargo, se requiere de una infraestructura rural mejorada, cadenas de suministro, servicios de asistencia y capacitaciones orientadas al desarrollo y uso de estas. Lo anterior se puede ver como una oportunidad no solo para el desarrollo del campo, sino la oportunidad de crear empleos nuevos y más atractivos para beneficiar a las áreas rurales que cuentan con procesos precarios de producción con herramientas de la agricultura 1.0 y 2.0. Es importante entender que el agricultor comercial de hoy debe tener dominio en las habilidades y conocimientos agrícolas existentes; en ese sentido, deberá convertirse en una especie de gerente de tecnología de la información que administre su sistema productivo desde una oficina o frente a una pantalla de computadora, teléfono móvil, tableta, entre otros.

## Conclusiones

- La agricultura colombiana se caracteriza por el uso de técnicas tradicionales, ubicadas entre la Agricultura 2.0 y 3.0, que han sido aplicadas por varias generaciones, ya sea porque están asociadas a un conocimiento cultural muy arraigado o porque la brecha tecnológica es un obstáculo para lograrlo.
- El desarrollo e implementación de tecnologías 4.0 que contribuyan a mejorar las actividades que se realizan en la agricultura y aumenten la productividad del sector se han presentado tarde en Colombia en comparación a avances a nivel mundial, es decir, sin generar acercamiento a tecnologías 5.0.
- La información disponible sobre la implementación de la Agricultura 5.0 en Colombia es escasa.
- El uso de tecnologías 4.0 en el país se ha visto desde el contexto de la academia. Pocas pruebas piloto se han desarrollado en campo para mostrar aspectos de inversión financiera, condiciones ambientales, requerimientos de infraestructura, beneficios de las tecnologías, entre otras.
- Incentivar el desarrollo de pruebas piloto en diversos sistemas agrícolas y regiones del país que muestren las implicaciones de paquetes tecnológicos 4.0 es una estrategia viable para implementar.

- Hay desarrollos de tecnologías de Agricultura 4.0 en el país. Cafeon, Agribot, IJCropSeed, AgroDSS y Amase son ejemplo de ello.
- La productividad académica en revistas indexadas en bases de datos de pares evaluadores sobre Agricultura 4.0 y 5.0 presenta pocos abordajes inter y transdisciplinarios que permitan dar respuesta y guiar la expansión de las respectivas tecnologías.
- El extensionista, como articulador de la investigación y el desarrollo tecnológico bajo el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA), tiene un rol vital para la difusión y adopción de las tecnologías emergentes para el agro, por ende, debe ser considerado en las estrategias gubernamentales que se lleguen a ejecutar.
- Las iniciativas gubernamentales de Colombia en la actualidad, como el CONPES 3975 y la guía con lineamientos generales para el uso de tecnologías emergentes, impulsan parcialmente la difusión y adopción de tecnologías de la Agricultura 4.0 y 5.0. A pesar de estos esfuerzos, aún no se abordan las barreras que presentan los pequeños y medianos productores.
- Los principales obstáculos de la adopción de tecnologías 4.0 y 5.0 en Colombia son el bajo acceso a internet en el campo, los costos elevados, la ausencia de gestión del conocimiento para capacitaciones en algunas zonas y la limitada inversión en investigación y desarrollo en la academia.
- Estrategias enfocadas en incentivar la integración generacional en los productores y campesinos puede fortalecer el proceso de adopción de las tecnologías 4.0 en el país. Adicionalmente, el fortalecimiento del recambio generacional en las diferentes instancias de la investigación y del gobierno y la implementación de tecnologías emergentes para el fortalecimiento de los presaberes y experiencias.

## Referencias

Abbasi, R., Martinez, P., Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry—a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 100042.



- Abioye, E.A., Abidin, M.S.Z., Mahmud, M.S.A., Buyamin, S., Ishak, M.H.I., Abd Rahman, M.K.I., Otuoze, A.O., Onotu, P., Ramli, M.S.A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105441.
- Abuchaibe, J., Gómez, X.J. (2021). Prototipo de aplicación móvil para la gestión de ventas en el sector agrícola integrando técnicas de inteligencia artificial y computación en la nube. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/16261>.
- Adobe. (2022). ¿Qué es la realidad aumentada? Explicación de la realidad aumentada. Tomado de <https://www.adobe.com/mx/products/substance3d/discover/what-is-ar.html> (Revisado el 22/11/2022).
- Alvarez, Y.A.M., Molano, J.I.R. (2022). Colombian agriculture: approaching agriculture 4.0. *Ingeniería Solidaria*, 18(2), 1-19.
- Apolo-Apolo, O.; Martínez-Guanter, J.; Egea, G.; Raja, P.; Pérez-Ruiz, M. (2020). Deep learning techniques for estimation of the yield and size of citrus fruits using a UAV. *European Journal of Agronomy*, 115, 126030.
- Aqeel-ur-Rehman, Z.A.S., Shaikh, N.A., Islam, N. (2010). An integrated framework to develop context-aware sensor grid for agriculture. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(5), 922-931.
- Arenales, J.V. (2022). ¿Cuál es el país latinoamericano con inversión más alta en tecnología en el último año? *Diario La República*. Disponible en: <https://www.larepublica.co/internet-economy/cual-pais-de-latinoamericano-con-inversion-mas-alta-en-tecnologia-en-el-ultimo-ano-3459655#:~:text=Particularmente%20en%20Colombia%2C%20la%20inversi%C3%B3n,innovaci%C3%B3n%20en%20todo%20el%20pa%C3%ADs> (Revisado el 21/10/2022).
- Ariza, C., Mayorga, O.L., Guadrón Duarte, L., Valencia Echavarría, D.M., Mestra Vargas, L.I., Santana Rodríguez, M.O., Ortiz, R.E., Pérez, A., Camargo, D.B., Carvajal, C.T., Parra, D., Sierra Alarcón, A.M. (2020). *Alimento: el valor nutricional de recursos forrajeros de Colombia*. Sistema de información. Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).
- Balaska, V., Adamidou, Z., Vryzas, Z., Gasteratos, A. (2023). Sustainable Crop Protection via Robotics and Artificial Intelligence Solutions. *Machines*, 11(8), 774.

- Bermeo-Almeida, O., Cardenas-Rodriguez, M., Samaniego-Cobo, T., Ferruzola-Gómez, E., Cabezas-Cabezas, R., Bazán-Vera, W. (2018). Blockchain in agriculture: A systematic literature review. In International Conference on Technologies and Innovation (pp. 44-56). Springer, Cham.
- Carvajalino-Umaña, J.D., Romero-Perdomo, F., López-González, M., Ardila, N., González-Curbelo, M.Á. (2022). Economía circular en Colombia: Panorama y estrategias para acelerar su implementación. En Serna E. (ed.), Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era, 187-200. Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- Castaño-Marín, A.M., Sánchez-Vivas, D.F., Duarte-Carvajalino, J.M., Góez-Vinasco, G.A., Araujo-Carrillo, G.A. (2023). Estimating Carrot Gross Primary Production Using UAV-Based Multispectral Imagery. *AgriEngineering*, 5(1), 325-337.
- Castillo-Díaz, F.J. (2022). Cinco aplicaciones de la inteligencia artificial en agricultura. Tomado de <https://www.plataformatierra.es/innovacion/IA-inteligencia-artificial-aplicaciones/> (Revisado el 21/11/2022).
- Chen, Y., Li, Y., Li, C. (2020). Electronic agriculture, blockchain and digital agricultural democratization: Origin, theory and application. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122071.
- Chi, M., Plaza, A., Benediktsson, J.A., Sun, Z., Shen, J., Zhu, Y. (2016). Big Data for Remote Sensing: Challenges and Opportunities, *Proceedings of the IEEE*, 104, 2207–2219.
- CIAT., IFPRI. Big Data Coordination Platform. (2017). Proposal to the CGIAR Fund Council. Available online: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10947/4303> (Revisado el 10/11/2022).
- Clark, M., Springmann, M., Rayner, M., Scarborough, P., Hill, J., Tilman, D., Macdiarmid, J.I., Fanzo, J., Bandy, L., Harrington, R. A. (2022). Estimating the environmental impacts of 57,000 food products. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(33), e2120584119.
- Contreras-Medina, D.I., Medina-Cuéllar, S.E., Rodríguez-García, J.M. (2022). Roadmapping 5.0 Technologies in Agriculture: A Technological Proposal for Developing the Coffee Plant Centered on Indigenous Producers' Requirements from Mexico, Via Knowledge Management. *Plants*, 11(11), 1502.

- DANE. Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019. (2020). Available: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2019/boletin\\_ena\\_2019.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2019/boletin_ena_2019.pdf) (Revisado el 23/11/2022).
- Da Silveira, F., Lermen, F.H., Amaral, F.G. (2021). An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. *Computers and Electronics in Agriculture*, 189, 106405.
- De Oliveira, M.E., Corrêa, C.G. (2020). Virtual Reality and Augmented reality applications in agriculture: a literature review. In 2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR) (pp. 1-9). IEEE.
- Delgadillo-Duran, D.A., Vargas-García, C.A., Varón-Ramírez, V.M., Calderón, F., Montenegro, A.C., Reyes-Herrera, P.H. (2022). Vis-NIR spectroscopy and machine learning methods to diagnose chemical properties in Colombian sugarcane soils. *Geoderma Regional*, 31, e00588.
- DeRosa M.C., Monreal C, Schnitzer M, Walsh R, Sultan Y. (2010). Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnol*, 5(2), 91
- Dey, K., Shekhawat, U. (2021). Blockchain for sustainable e-agriculture: Literature review, architecture for data management, and implications. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128254.
- Dhewa T. (2015) Nanotechnology applications in agriculture: an update. *Octa Journal of Environmental Research*, 3(2), 204–211.
- Duarte-Carvajalino, J.M., Silva-Arero, E.A., Góez-Vinasco, G.A., Torres-Delgado, L.M., Ocampo-Paez, O.D., Castaño-Marín, A.M. (2021). Estimation of water stress in potato plants using hyperspectral imagery and machine learning algorithms. *Horticulturae*, 7(7), 176.
- Eli-Chukwu, N.C. (2019). Applications of artificial intelligence in agriculture: A review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(4), 4377-4383.
- European Commission. (2022). Industry 5.0: Towards More Sustainable, Resilient and Human-Centric Industry. Available online: [https://ec.europa.eu/info/news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-jan-07\\_](https://ec.europa.eu/info/news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-jan-07_) (Revisado el 10/11/2022).
- Equipo de edX. (2021). Inteligencia Artificial vs. Aprendizaje Automático: Explicación y consejos de aprendizaje. Tomado de <https://blog.edx.org/es/inteligencia-artificial-vs->

aprendizaje-automatico-explicacion-y-consejos-de-aprendizaje. Revisado el 21/11/2022

- Everingham, Y., Sexton, J., Skocaj, D., Inman-Bamber, G. (2016). Accurate prediction of sugarcane yield using a random forest algorithm. *Agronomy for sustainable development*, 36(2), 1-9.
- FAO. (2021). Más que solo criptomonedas: uso de blockchain para la acción climática en la agricultura. Tomado de <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/news/detail-news/es/c/1402107/> (Revisado el 24/11/2022).
- Faxon, H.O. (2023). Small farmers, big tech: agrarian commerce and knowledge on Myanmar Facebook. *Agriculture and Human Values*, 40, 897–911.
- Feng, P., Wang, B., Li Liu, D., Waters, C., Xiao, D., Shi, L., Yu, Q. (2020). Dynamic wheat yield forecasts are improved by a hybrid approach using a biophysical model and machine learning technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285, 107922.
- Florez- Martinez, D., Uribe-Galvis C.P. (2020). Fourth Industrial Revolution Technologies for Agriculture Sector: a trend analysis in Agriculture 4.0. 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development” “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy”, 27-31 July 2020, Virtual Edition. DOI <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.11> ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390
- Fountas, S., Carli, G., Sørensen, C.G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., Tisserye, B. (2015). Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 40-50.
- Fraser, E. D., Campbell, M. (2019). Agriculture 5.0: reconciling production with planetary health. *One Earth*, 1(3), 278-280.
- 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.
- Fu, Z.; Jiang, J.; Gao, Y.; Krienke, B.; Wang, M.; Zhong, K.; Cao, Q.; Tian, Y.; Zhu, Y.; Cao, W. (2020). Wheat growth monitoring and yield estimation based on multi-rotor unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, 12, 508.

- Gai, R., Chen, N., Yuan, H. (2023). A detection algorithm for cherry fruits based on the improved YOLO-v4 model. *Neural Computing and Applications*, 35(19), 13895-13906.
- Gao, Y., Cao, Z., Cai, W., Gong, G., Zhou, G., Li, L. (2023). Apple Leaf Disease Identification in Complex Background Based on BAM-Net. *Agronomy*, 13(5), 1240.
- Ghandar, A., Ahmed, A., Zulfiqar, S., Hua, Z., Hanai, M., Theodoropoulos, G. (2021). A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics. *IEEE Access*, 9, 35691-35708.
- Gil, G., Casagrande, D.E., Cortés, L.P., Verschae, R. (2023). Why the low adoption of robotics in the farms? Challenges for the establishment of commercial agricultural robots. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100069.
- Gobierno de Colombia. (2021). Marco ético para la inteligencia Artificial en Colombia. Disponible en <https://minciencias.gov.co/sites/default/files/marco-etico-ia-colombia-2021.pdf> (Revisado el 30/11/2022)
- Gogos A., Knauer, K., Bucheli, T.D. (2012). Nanomaterials in plant protection and fertilization: current state, foreseen applications, and research priorities. *Journal of Agricultural and Food Chemical*, 60(39), 9781–9792.
- Gour, B., Maurya, J.P. (2023). Intelligent and Smart Agriculture System Using Cooperative Approach. *Intelligent Sensor Node-Based Systems: Applications in Engineering and Science*, 23(3), 211.
- Gralla, P. (2018). Precision Agriculture Yields Higher Profits, Lower Risks. Available online: <https://www.hpe.com/us/en/insights/articles/precision-agriculture-yields-higher-profits-lower-risks-1806.html> (Revisado el 23/11/2022)
- Gu, J.; Wang, Z.; Kuen, J.; Ma, L.; Shahroudy, A.; Shuai, B.; Liu, T.; Wang, X.; Wang, G.; Cai, J. (2018). Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern Recognition*. 77, 354–377
- Hang, L., Ullah, I., Kim, D.-H. (2020). A secure fish farm platform based on blockchain for agriculture data integrity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170.
- Heimstädt, C. (2023). Making plant pathology algorithmically recognizable. *Agriculture and Human Values*, 40, 865–878.
- Himesh, S. (2018). Digital revolution and Big Data: A new revolution in agriculture. *CABI Reviews*, 13, 1–7

- Hinson, R., Lensink, R., Mueller, A. (2019). Transforming agribusiness in developing countries: SDGs and the role of FinTech. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 41, 1–9.
- Hutchins, J., Hueth, B. (2023). 100 years of data sovereignty: Cooperative data governance and innovation in US dairy. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 45, 1551–1576.
- Huuskonen, J., Oksanen, T. (2018). Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 154, 25-35.
- Huynh-The, T., Pham, Q.V., Pham, X.Q., Nguyen, T.T., Han, Z., Kim, D.S. (2023). Artificial intelligence for the metaverse: A survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, 105581.
- Ibrahim EA. (2016). Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. *Journal of Plant Physiology*, 192, 38–46.
- Ibrahim, I. A., Truby, J. M. (2023). FarmTech: Regulating the use of digital technologies in the agricultural sector. *Food and Energy Security*, 12, e483.
- Industry Research. (2022). *Global Big Data Analytics in Agriculture Industry Research Report, Competitive Landscape, Market Size, Regional Status and Prospect*. Tomado de <https://www.industryresearch.biz/enquiry/request-sample/21534364> (Revisado el 23/11/2022).
- Jia, H., Wang, J., Cao, C., Pan, D., Shi, P. (2012). Maize drought disaster risk assessment of China based on EPIC model. *International Journal of Digital Earth*, 5(6), 488-515.
- Jiang, S., Zhou, J., Qiu, S. (2022). Digital agriculture and urbanization: mechanism and empirical research. *Technological Forecasting and Social Change*, 180, 121724.
- Jiao, X., Chai, S., Wang, S. (2010). Virtual Assembly of Agriculture Equipment Key Components Based on Virtual Reality Technique. In *2010 Third International Conference on Information and Computing (Vol. 1, pp. 27-30)*. IEEE.
- Jie, H. U., Jiabin, W.A.N.G., Zhongjun, D.U., Xiaoguang, L.I.U. (2019). Application Status of Big Data in Agriculture and International Cooperation. In *Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1314, No. 1, p. 012201)*. IOP Publishing.
- Jiménez, M., Abbott, P., Foster, K. (2018). Measurement and analysis of agricultural productivity in Colombia. *Ecos de Economía*, 22(47), 4-37.

- Jung, J.; Maeda, M.; Chang, A.; Bhandari, M.; Ashapure, A.; Landivar-Bowles, J. (2021). The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 15–22
- Kakani, V., Nguyen, V.H., Kumar, B.P., Kim, H., Pasupuleti, V.R. (2020). A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100033.
- Kaloxyllos, A., Groumas, A., Sarris, V., Katsikas, L., Magdalinos, P., Antoniou, E., Politopoulou, Z., Wolfert, S., Brewster, C., Eigenmann, R., Terol, C.M. (2014). A cloud-based Farm Management System: Architecture and implementation. *Computers and electronics in agriculture*, 100, 168-179.
- Kamir, E., Waldner, F., Hochman, Z. (2020). Estimating wheat yields in Australia using climate records, satellite image time series and machine learning methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 160, 124-135.
- Kamilaris, A.; Kartakoullis, A.; Prenafeta-Boldú, F.X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 143, 23–37.
- Kamilaris, A., Prenafeta-Boldú, F.X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and electronics in agriculture*, 147, 70-90.
- Kamilaris, A., Fonts, A., Prenafeta-Boldú, F.X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in food science & technology*, 91, 640-652.
- Kah M, Beulke S, Tiede K, Hofmann T. (2013). Nanopesticides: state of knowledge, environmental fate, and exposure modeling. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(16), 1823–1867.
- Kaizu, Y., Choi, J. (2012). Development of a tractor navigation system using augmented reality. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 5(3), 96-101.
- Khan, M.A.; Akram, T.; Sharif, M.; Awais, M.; Javed, K.; Ali, H.; Saba, T. (2018). CCDF: Automatic system for segmentation and recognition of fruit crops diseases based on correlation coefficient and deep CNN features. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 220–236.

- Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen journal of life sciences*, 90, 100315.
- Klerkx, L., Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?. *Global Food Security*, 24, 100347.
- Kong, Q., Kuriyan, K., Shah, N., Guo, M. (2019). Development of a responsive optimisation framework for decision-making in precision agriculture. *Computers & Chemical Engineering*, 131(5), 106585.
- Lee, L.H., Braud, T., Zhou, P., Wang, L., Xu, D., Lin, Z., Kumar, A., Bermejo, C., Hui, P. (2021). All one needs to know about metaverse: A complete survey on technological singularity, virtual ecosystem, and research agenda. *arXiv preprint arXiv:2110.05352*.
- Lezoche, M., Hernandez, J.E., Díaz, M.D.M.E.A., Panetto, H., Kacprzyk, J. (2020). Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers in industry*, 117, 103187.
- Li, H. (2007). Analysis of virtual reality technology applications in agriculture. In *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture* (pp. 133-139). Springer, Boston, MA.
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G.P., Abu-Mahfouz, A.M. (2020). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322-4334.
- Mahakham, W., Sarmah, A.K., Maensiri, S., Theerakulpisut, P. (2017). Nanopriming technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles. *Scientific Reports*, 7(1):8263
- Mahapatra, D.M., Satapathy, K.C., Panda, B. (2022). Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycoprosects and challenges. *Science of the total environment*, 803, 149990.
- Manjunatha, S.B., Biradar, D.P., Aladakatti, Y.R. (2016). Nanotechnology and its applications in agriculture: a review. *Journal of Farm Science*, 29(1):1-13.
- Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., Ordoñez, J. (2021). Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911.



- Mariani, J.; Kaji, J. (2016). From Dirt to Data: The Second Green Revolution and IoT. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/deloitte-review/issue-18/second-green-revolution-and-internet-of-things.html> (Revisado el 23/11/2022).
- Mendez Bocanegra, L. F. (2020). Análisis comparativo de la implementación de industria 4.0 en la agricultura de México y Colombia [Trabajo de Grado Pregrado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Hualago Universidad de Pamplona. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5214>
- Mendoza-Labrador, J., Romero-Perdomo, F., Abril, J., Hernández, J.P., Uribe-Vélez, D., Buitrago, R.B. (2021). *Bacillus* strains immobilized in alginate macrobeads enhance drought stress adaptation of guinea grass. *Rhizosphere*, 19, 100385.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e innovación. (2023). AgroTIC: una estrategia colectiva en la producción y comercialización de cítricos. Gobierno de Colombia. Disponible en <https://apropiaconsentido.minciencias.gov.co/16330/agrotic-una-estrategia-colectiva-en-la-produccion-y-comercializacion-de-citricos/> (Revisado el 04/09/2023)
- Ministerio de las Tecnologías y las Telecomunicaciones. (2022). Guía con lineamientos generales para el uso de tecnologías emergentes. Gobierno de Colombia. Disponible en: [https://gobiernodigital.mintic.gov.co/692/articulos-160829\\_Guia\\_Tecnologias\\_Emergentes.pdf](https://gobiernodigital.mintic.gov.co/692/articulos-160829_Guia_Tecnologias_Emergentes.pdf) (Revisado el 26/11/2022).
- Misra, N.N., Dixit, Y., Al-Mallahi, A., Bhullar, M.S., Upadhyay, R., Martynenko, A. (2020). IoT, big data and artificial intelligence in agriculture and food industry. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(9), 6305 – 6324.
- Mosquera-Lopez C., Sánchez T., Gomez C. (2020). Propuesta metodológica para la identificación de un modelo de valoración económica de datos en el sector agrícola de Colombia. Center for the fourth industrial revolution. Disponible en: <https://c4ir.co/wp-content/uploads/2021/04/Propuesta-metodologica-para-la-identificacion-de-un-modelo-de-valoracion-economica-de-datos-en-el-sector-agricola.pdf> (Revisado el 29/11/2022).
- Murugesan, R.; Sudarsanam, S.K.; Malathi, G.; Vijayakumar, V.; Neelanarayanan, V.; Venugopal, R.; Rekha, D.; Summit, S.; Rahul, B.; Atishi, M. (2019). Artificial Intelligence and Agriculture 5.0. *International Journal of Recent Technology Engineering*, 8, 1870-1877.

- Naderi, M.R., Danesh-Shahraki, A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19):2229-2232.
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A Human - Centric Solution. *Sustainability*, 11(16), 4371.
- Näsi, R.; Viljanen, N.; Kaivosoja, J.; Alhonoja, K.; Hakala, T.; Markelin, L.; Honkavaara, E. (2018). Estimating biomass and nitrogen amount of barley and grass using UAV and aircraft based spectral and photogrammetric 3D features. *Remote Sensing*, 10, 1082.
- Network of the Central People's Government of the People's Republic of China. (2015). Some opinions of the General Office of the State Council on the use of big data to strengthen services and supervision of market players. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/01/content\\_9994.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/01/content_9994.htm) (Revisado el 30/11/2022)
- Network of the Central People's Government of the People's Republic of China. (2016). Outline of the Thirteenth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content\\_5054992.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm). (Revisado el 23/11/2022)
- Nicholson, C.F., Kopainsky, B., Stephens, E.C., Parsons, D., Jones, A.D., Garrett, J., Phillips, E.L. (2020). Conceptual frameworks linking agriculture and food security. *Nature Food*, 1(9), 541-551.
- Nigam, A., Kabra, P., Doke, P. (2011). Augmented Reality in agriculture. In 2011 IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob) (pp. 445-448). IEEE.
- OCDE. (2015). OECD Review of Agricultural Policies: Colombia 2015. [https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-review-of-agricultural-policies-colombia-2015\\_9789264227644](https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-review-of-agricultural-policies-colombia-2015_9789264227644) (Revisado el 29/11/2022)
- Ojeda-Beltrán. (2022). Plataformas tecnológicas en la Agricultura 4.0: Una mirada al desarrollo en Colombia. *Journal of Computer and Electronic Science: Theory and Applications*, 3(1), 9–18.
- Orjuela Santamaria, L.N., *Economista*. (2021). Alcanzando el hambre cero en Colombia con tecnologías emergentes. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/39370#.Y3-CQGV0PYI.mendeley>

- Park, S.M., Kim, Y.G. (2022). A Metaverse: Taxonomy, components, applications, and open challenges. *IEEE Access*, 10, 4209-4251.
- Pathan, M., Patel, N., Yagnik, H., Shah, M. (2020). Artificial cognition for applications in smart agriculture: a comprehensive review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 81–95.
- Rambauth-Ibarra, G.E. (2021). Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola. *Journal of Computer and Electronic Science: Theory and Applications*, 3(1): 37–38. <https://doi.org/10.17981/cesta.03.01.2022.04>
- Red de Especialistas en la Agricultura. (2020). El uso de la Blockchain para el sector agrícola. Caso Latinoamérica. Tomado de <https://agricultureros.com/el-uso-de-la-blockchain-para-el-sector-agricola-caso-latinoamerica/> (Revisado el 24/11/2022).
- Rejeb, A., Rejeb, K., Abdollahi, A., Al-Turjman, F., Treiblmaier, H. (2022). The Interplay between the Internet of Things and agriculture: A bibliometric analysis and research agenda. *Internet of Things*, 100580.
- Rico Muñoz A. (2022). Solo se está aprovechando 13,5% de los 39,2 millones de hectáreas con potencial. *La República*. <https://bit.ly/3VxHVCQ>.
- Rios Ato, L.N., Vera Zapata, A.L. (2021). Tecnología Blockchain y la logística internacional en el sector agrícola de Latinoamérica. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/88957#.Y4Vuwll0snU.mendele>  
y
- Romero-Perdomo, F., González-Curbelo, M.Á. (2023). Integrating Multi-Criteria Techniques in Life-Cycle Tools for the Circular Bioeconomy Transition of Agri-Food Waste Biomass: A Systematic Review. *Sustainability*, 15(6), 5026.
- Romero-Perdomo, F., Camelo-Rusinque, M., Criollo-Campos, P., Bonilla-Buitrago, R. (2015). Efecto de la temperatura y el pH en la producción de biomasa de *Azospirillum brasilense* C16 aislada de pasto guinea. *Pastos y Forrajes*, 38(3), 171-175.
- Rovira-Más, F., Zhang, Q., Reid, J.F. (2008). Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 60(2), 133-143.
- Rose, D.C., Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87.
- Ryan, M. (2020). Agricultural big data analytics and the ethics of power. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 33(1), 49-69.

- Saiz-Rubio, V., Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 10(2), 207.
- Salinas-Velandia, D.A., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Villagrán, E., Donado-Godoy, P., Galindo-Pacheco, J.R. (2022). Insights into Circular Horticulture: Knowledge Diffusion, Resource Circulation, One Health Approach, and Greenhouse Technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12053.
- Sanchez-Cespedes, J.M., Rodriguez-Miranda, J.P., Salcedo-Parra, O.J. (2022). Aplicación de la inteligencia artificial en la formulación de políticas públicas relacionadas con la vocación agrícola de las regiones. *Revista Científica*, 44(2), 172-187.
- Sánchez López, D.B., Romero Perdomo, F.A., Bonilla Buitrago, R.R. (2014). Respuesta de *Physalis peruviana* L. a la inoculación con bacterias solubilizadoras de fosfato. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(5), 901-906.
- Saurabh, S., Dey, K. (2021). Blockchain technology adoption, architecture, and sustainable agri-food supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124731.
- Shukla, P., Chaurasia, P., Younis, K., Qadri, O.S., Faridi, S.A., Srivastava, G. (2019). Nanotechnology in sustainable agriculture: studies from seed priming to post-harvest management. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 4(1), 1-15.
- Sivarajah, U., Kamal, M.M., Irani, Z., Weerakkody, V. (2017). Critical analysis of Big Data challenges and analytical methods. *Journal of Business Research*, 70, 263–286.
- Solanki, P., Bhargava, A., Chhipa, H., Jain, N., Panwar, J. (2015). Nanofertilizers and their smart delivery system. In: *Nanotechnologies in food and agriculture*. Springer, Switzerland, pp 81–101.
- Stewart, E.L., Wiesner-Hanks, T., Kaczmar, N., DeChant, C., Wu, H., Lipson, H., Nelson, R.J., Gore, M.A. (2019). Quantitative phenotyping of Northern Leaf Blight in UAV images using deep learning. *Remote Sensing*. 11, 2209.
- Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural networks*, 61, 85-117.
- Shamshiri, R.R., Weltzien, C., Hameed, I.A., Yule, I.J., Grift, T.E., Balasundram, S.K., Pitonakova, L., Ahmad, D., Chowdhary, G. (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 1-14.

- Sharma, R., Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Kumar, V., Kumar, A. (2020). A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance. *Computers & Operations Research*, 119, 104926.
- Shi, X., An, X., Zhao, Q., Liu, H., Xia, L., Sun, X., Guo, Y. (2019). State-of-the-art internet of things in protected agriculture. *Sensors*, 19(8), 1833.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE internet of things journal*, 3(5), 637-646.
- Sitompul, T. A., Wallmyr, M. (2019). Using augmented reality to improve productivity and safety for heavy machinery operators: State of the art. In *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry* (pp. 1-9).
- Sozer, N., Kokini, J.L. (2009). Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends Biotechnology*, 27(2), 82–89
- Su, Y., Wang, X. (2021). Innovation of agricultural economic management in the process of constructing smart agriculture by big data. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 31, 100579.
- Taj, I., Zaman, N. (2022). Towards Industrial Revolution 5.0 and Explainable Artificial Intelligence: Challenges and Opportunities. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 12(1), 295-320.
- Tapias, J.E. (2021). Análisis del estado del arte del internet de las cosas aplicado a cultivos aeropónicos e hidropónicos a nivel nacional e internacional. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/44574>
- Tesfaye, K., Sonder, K., Cairns, J., Magorokosho, C., Tarekegn, A., Kassie, G.T. (2016). Targeting drought-tolerant maize varieties in southern Africa: a geospatial crop modeling approach using big data. *International Food and Agribusiness Management Review*, 19.
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances, and future challenges. *Biosystems engineering*, 164, 31-48.
- Vemuri, R. (2021). Agriculture and technology: the future landscape. Tomado de <https://community.nasscom.in/communities/agritech/agriculture-and-technology-future-landscape> (Revisado el 09/11/2022)

- Villa-Henriksen, A., Edwards, G.T.C., Pesonen, L.A., Green, O., and Sorensen, C.A.G. (2020). Internet of things in arable farming: implementation, applications, challenges and potential, *Biosystems Engineering*, 191, 60–84.
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (24), 6148–6150.
- Wang, J., Yue, H., Zhou, Z. (2017). An improved traceability system for food quality assurance and evaluation based on fuzzy classification and neural network. *Food control*, 79, 363-370.
- Wao, A.A., Wao, A.A. (2023). Intelligent Agriculture System. En *Intelligent Sensor Node-Based Systems: Applications in Engineering and Science*, 193.
- Yang, F., Wang, K., Han, Y., Qiao, Z. (2018). A cloud-based digital farm management system for vegetable production process management and quality traceability. *Sustainability*, 10(11), 4007.
- Yu, F., Zhang, J.F., Zhao, Y., Zhao, J.C., Tan, C., Luan, R.P. (2009). The research and application of virtual reality (VR) technology in agriculture science. In *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture* (pp. 546-550). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Zhai, Z., Martínez, J.F., Beltran, V., Martínez, N.L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256.
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M.G., Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*, 7(1), 36.

